

Mapa de susceptibilidad a deslizamientos en el distrito de San Miguelito, Panamá, incorporando herramientas de sistema de información geográfica

Landslide susceptibility map of San Miguelito district, Panama, based on geographic information system

Avril Díaz ^{1*}, Daniel Acosta ¹, Deeyvid Sáez ²

¹ Alumno egresado de la facultad de Ingeniería Civil, Campus Victor Levi Sasso, Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá,

² Docente tiempo completo de la facultad de Ingeniería Civil, Campus Victor Levi Sasso, Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá,

*Autor de correspondencia: avril_2992@hotmail.com

RESUMEN— Se elaboró un mapa de susceptibilidad a deslizamientos de tierra del distrito de San Miguelito (Panamá), mediante el análisis y validación de un modelo estadístico bivariable, incorporando herramientas del Sistema de Información Geográfica (SIG). Como datos de entrada se utilizaron un mapa inventario de deslizamientos y los mapas de parámetros. Para este propósito, se inició definiendo los conceptos de gestión de riesgo y la relación correspondiente con los parámetros que influyen en la inestabilidad de laderas, los cuales en materia de susceptibilidad se confeccionaron los mapas de elevación, pendiente, curvatura y orientación del terreno; mapas de proximidad a carreteras y ríos, mapa geotécnico de San Miguelito. Utilizando los registros de desastres naturales documentados en Desinventar (2018), se confeccionaron dos mapas de inventario de deslizamientos: un inventario preciso, para correr el modelo; y un inventario aproximado, para el proceso de validación. Con los datos de entrada generados, se desarrolló el método estadístico de relación de frecuencia para derivar el mapa de susceptibilidad a deslizamientos en la zona de estudio, clasificado en siete niveles de probabilidad a que ocurra un deslizamiento. Los resultados de esta investigación concluyen que un 68.2% del área total de San Miguelito presenta una susceptibilidad de moderada a muy alta a los deslizamientos de tierra, siendo el corregimiento de Arnulfo Arias, el más susceptible. De acuerdo con la validación del modelo, el mapa de susceptibilidad predice en un 88% la existencia de una zona de alta susceptibilidad en el área de estudio.

Palabras clave— *Susceptibilidad al deslizamiento, San Miguelito, sistemas de información geográfica, mapas de parámetros, mapa de inventario de deslizamientos, índice de la relación de frecuencia.*

ABSTRACT— A landslide susceptibility map of San Miguelito District (Panama) was derived through the analysis and validation of a bivariate statistical model, which was developed incorporating Geographic Information System tools (GIS). The dataset considered in this study were a landslide inventory map and parameters maps. For this purpose, the study by was started defining risk management concepts and their relationship with the suitable parameters that are involve in slope failures for each risk concept case, which in susceptibility matter maps were made of elevation, slope, curvature, and aspect. Also, proximity to roads and rivers mapping, and a geotechnical map of San Miguelito. In addition, utilizing all disaster registered at the website Desinventar (2018), two landslide inventory maps were generated. One of them for the model and the other one for the validation process. With the generated dataset, was developed the landslide susceptibility index method (LSI) to derive the landslide susceptibility in the study area, classified in seven levels of probability of landslide occurrence. The outcomes conclude that a 68.2% of San Miguelito shows a moderate to very high landslide susceptibility, where Corregimiento Arnulfo Arias is the most susceptible. According to the validating procedure, the landslide susceptibility map can predict in an 88% of probabilities that a high susceptibility zone in the study area does exist.

Keywords— *Landslide susceptibility, San Miguelito, geographic information system, parameters map, landslide inventory map, landslide statistical index.*

1. Introducción

Según el estudio Sitios Importantes para Desastres Naturales realizado por el Banco Mundial [1], Panamá posee un 15% de su territorio expuesto a desastres naturales y el 12% de su población es vulnerable a dos o más amenazas.

Desde finales de los años 1920 hasta la actualidad, el Sistema Nacional de Protección Civil (SINAPROC) ha registrado los desastres naturales ocurridos en Panamá a través del sitio de internet Desinventar.org [2], esta información ha sido utilizada como fuente principal en la presente investigación.

Citación: A. Díaz, D. Acosta y D. Sáez, “Mapa de susceptibilidad a deslizamientos en el distrito de San Miguelito, Panamá, incorporando herramientas de sistema de información geográfica”, *Revista de I+D Tecnológico*, vol. 15, no. 1, pp. (59-70), 2019.

Tipo de artículo: Original. **Recibido:** 24 de agosto de 2018. **Recibido con correcciones:** .28 de agosto de 2018. **Aceptado:** 19 de noviembre de 2018.

DOI <https://doi.org/10.33412/idt.v15.1.2100>

Copyright: 2019 A. Díaz, D. Acosta y D. Sáez. This is an open access article under the CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).

En el análisis de estos registros, se ha observado que las inundaciones y deslizamientos de tierra son los que más daño han ocasionado a la población, contabilizándose un total de 546 deslizamientos entre los años 1929 y 2018. La recurrencia de este fenómeno ha ido en incremento, en los últimos diez años, doce de los deslizamientos ocurridos a nivel nacional han causado la muerte de veintinueve personas.

1.1 Deslizamientos de tierra

Técnicamente, los deslizamientos de tierra se definen como el proceso de falla de un talud y el área de influencia a su alrededor. Estos pueden ocurrir de forma repentina, en un corto período de tiempo, o puede ser un proceso prolongado y complejo [3].

De manera general, para que se produzca una falla en un talud o ladera y ocurra un deslizamiento, deben intervenir y modificarse varios factores. Entre estos factores podemos mencionar: la estructura y composición geológica del suelo, los cambios climáticos, cambios en la geomorfología del terreno y las acciones antropogénicas. La combinación de estos factores genera cambios en el nivel freático, cambios en el grado de saturación del suelo, aumento en el peso de la estructura del suelo, meteorización, entre otros [4].

1.2 Descripción del área de estudio

El área de estudio seleccionada para esta investigación es el distrito de San Miguelito, ubicado en la provincia de Panamá. Es el segundo distrito más poblado de la república, solo después del distrito de Panamá, con una población de 315,019 habitantes y una superficie aproximada de 50 km² [5]. Actualmente se compone de nueve corregimientos, todos con nombres de expresidentes del país y personalidades históricas panameñas como Amelia Denis de Icaza, Belisario Porras, José Domingo Espinar, Mateo Iturralde, Victoriano Lorenzo, Belisario Frías, Omar Torrijos, Arnulfo Arias y Rufina Alfaro.

A partir de la base de datos, se obtuvo que el distrito concentra un 28% del total de deslizamientos ocurridos a nivel nacional y el 53% respecto a la provincia de Panamá y Panamá Oeste (figura 1).

1.3 Estudio de deslizamientos de tierra en Panamá

Panamá ha sido un pilar fundamental en el desarrollo de las teorías de análisis de estabilidad de taludes. Esto se debe a que, durante la construcción del Canal de

Panamá, se originaron numerosos deslizamientos de tierra, los cuales impulsaron a ingenieros geotécnicos de todas partes del mundo a realizar investigaciones sobre el comportamiento de los taludes [6].

Adicionalmente, se han desarrollado diversos estudios enfocados a relacionar la estabilidad de taludes con la confección de mapas para identificación de zonas vulnerables a deslizamientos en distintos lugares del país [7, 8]. Siguiendo esta línea de investigación, se ha buscado zonificar el área de estudio en distintos niveles de susceptibilidad de acuerdo con el análisis e interpretación de un mapa elaborado con herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG). Como consecuencia, este mapa posee la versatilidad de actualizarse para futuros estudios, tanto para añadir o descartar información y de este modo obtener nuevos resultados.

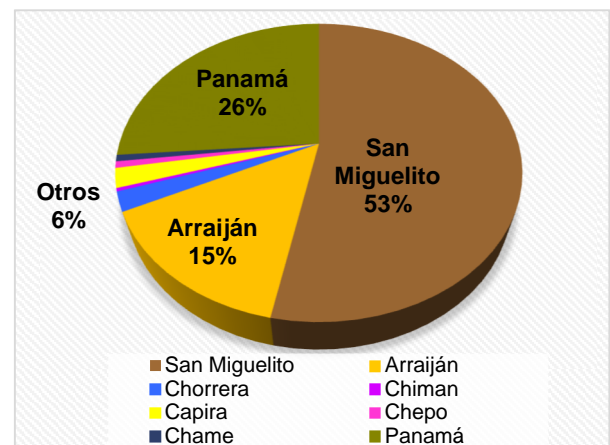


Figura 1. Distribución de deslizamientos ocurridos en los distritos de Panamá y Panamá Oeste, periodo de 1929-2018.

Para lograr este objetivo, se definen los conceptos de gestión de riesgo, con el propósito de desarrollar una comprensión de la metodología seleccionada y sus distintas limitaciones. Posteriormente, se muestran los datos de entrada utilizados en el modelo de susceptibilidad a deslizamientos y finalmente, los resultados de la metodología incorporada con su respectivo análisis.

2. Formulación teórica de susceptibilidad a deslizamientos de tierra

Una de las mejores estrategias para reducir los impactos de los deslizamientos es la prevención, que precisa de la evaluación del riesgo. La caracterización del

riesgo se expresa usualmente de forma cartográfica mediante la zonificación del territorio.

En el campo de los deslizamientos existe una amplia diversidad de conceptos para hacer referencia al tema del riesgo del suelo a desplazarse, quienes se desarrollan secuencialmente para el cálculo del riesgo (figura 2).

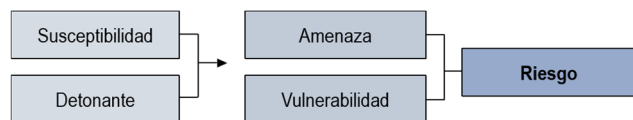


Figura 2. Esquema relacional de los diferentes conceptos para el cálculo del riesgo a deslizamiento.

Estos pueden definirse como:

- **Susceptibilidad:** Se define como qué tan propenso es un terreno al deslizamiento [9], independiente de los daños que cause a los elementos de riesgo, como bienes materiales y personas [10].
- **Detonante:** Es la acción de inicio o disparo del fenómeno del deslizamiento, que normalmente se identifica con fuertes lluvias o con terremotos.
- **Amenaza:** Es la probabilidad de que ocurra un deslizamiento dentro de un período de tiempo especificado y dentro de un área dada [11].
- **Vulnerabilidad:** Es el daño que se puede causar a la población o elemento de riesgo dentro del área afectada por el deslizamiento [12]. Comúnmente se expresa en una escala de 0 (sin pérdidas) a 1 (pérdida total) [13] y suele colocarse en contexto utilizando términos monetarios, como pérdida experimentada por una propiedad determinada o pérdida de vidas [14].
- **Riesgo:** Es la medida de que una amenaza se convierta en evento y cause daño a una comunidad vulnerable y sin capacidad de intervención. En otras palabras, es la combinación de la amenaza y la vulnerabilidad [10].

En el desarrollo de planes de riesgo para la detección temprana de desastres naturales en una región específica, es fundamental la comprensión de cada uno de los conceptos antes definidos, debido a que de esta forma se identifican las distintas variables que deben tomarse en consideración para realizar los estudios pertinentes con un enfoque adecuado.

Como se aprecia en la figura 2, la evaluación de la susceptibilidad a los deslizamientos de tierra se posiciona como el primer eslabón de la cadena, donde se identifican las distintas zonas propensas a deslizamientos y sus niveles de probabilidad de ocurrencia.

2.1 Elaboración de mapas de susceptibilidad a deslizamientos

Al confeccionar un mapa de susceptibilidad a deslizamientos, se logra zonificar las unidades de terreno que muestran una actividad de deslizamientos similar o de igual potencial de inestabilidad producto de la correlación de algunos de los principales parámetros que contribuyen al deslizamiento de tierras con la distribución pasada de fallas de taludes o inventario de deslizamientos [9, 15, 16].

2.1.1 Selección del método

Actualmente, se destacan tres metodologías utilizadas en la evaluación y confección de mapas de susceptibilidad: los métodos determinísticos, probabilísticos y geomorfológicos [17]. En la tabla 1 se resume de manera general algunas ventajas y desventajas identificadas en cada uno de estos métodos.

Tabla 1. Comparación de los métodos de evaluación de susceptibilidad a deslizamientos

Método	Ventaja	Desventaja
Determinístico	Estudio detallado a gran resolución sobre la falla de un talud.	Requiere inventarios de deslizamientos con pruebas de laboratorio y levantamiento topográfico detallado.
Probabilístico	Implementación de modelos matemáticos replicables y flexibles para anexar o reducir información y obtener mejores resultados.	Se requiere de un inventario de deslizamiento con ubicación geográfica conocida y mapas de parámetros, muchas veces no existen para la zona de estudio en interés.
Geomorfológico	Método moderno que incorpora tecnologías de	Se requieren imágenes digitales de

	detección remota a través de SIG.	alta resolución a costos muy elevados.
--	-----------------------------------	--

Para el desarrollo de este estudio se seleccionó el método probabilístico, debido a que, además de las ventajas antes presentadas, es factible para confeccionar mapas de susceptibilidad en una escala de trabajo mayores a 1:25000, ideal para la extensión territorial de San Miguelito. Pese a las desventajas encontradas, cada uno de los datos de entrada fueron confeccionados en forma de mapas a través de SIG.

3. Datos

El procedimiento SIG para la confección del mapa de susceptibilidad a deslizamientos, requiere de información de entrada representada a través de mapas. Siguiendo el método probabilístico, se destacan dos mapas fundamentales: el mapa de inventario de deslizamiento y los mapas de parámetros.

3.1 Mapa de inventario de deslizamientos

El inventario de deslizamiento es la forma cartográfica más directa de la susceptibilidad a los movimientos de ladera. El producto final proporciona la distribución espacial de los movimientos del terreno representados con polígonos a escala o como puntos.

El registro de deslizamientos de Desinventar consta de 160 casos de deslizamientos de tierra reportados en San Miguelito. Esta información fue utilizada para confeccionar dos tipos de mapas de inventario de deslizamientos: un mapa de inventario de alta precisión y un mapa de inventario aproximado (tabla 2).

Tabla 2. Inventarios y cantidad de deslizamientos. Ref.: Desinventar 2018

Tipo de inventario	Cantidad
Deslizamientos con ubicación precisa	54
Deslizamientos con ubicación aproximada	85
Deslizamientos no ubicados	21
Total de deslizamientos	160

El primer mapa se identificó como inventario preciso (figura 3), ya que los registros contaban con detalles

específicos como el barrio, sector y número de casa afectada donde tuvo lugar el evento. Este mapa se utilizó para correr el modelo matemático que calcula la susceptibilidad a deslizamientos.

Por otra parte, el inventario aproximado (figura 4) se le otorgó una ubicación descriptiva aproximada. Para efectos de este inventario se presume que la localización del deslizamiento se ubica dentro de un radio de influencia de 50 metros, de acuerdo con la descripción reportada.

Los deslizamientos restantes, no se lograron localizar debido a falta de información e inconsistencias en la ubicación descrita en los reportes de Desinventar.

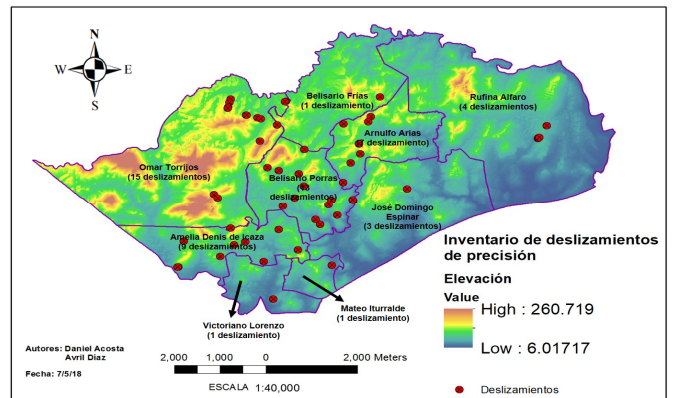


Figura 3. Mapa de inventario de deslizamientos con ubicación precisa.

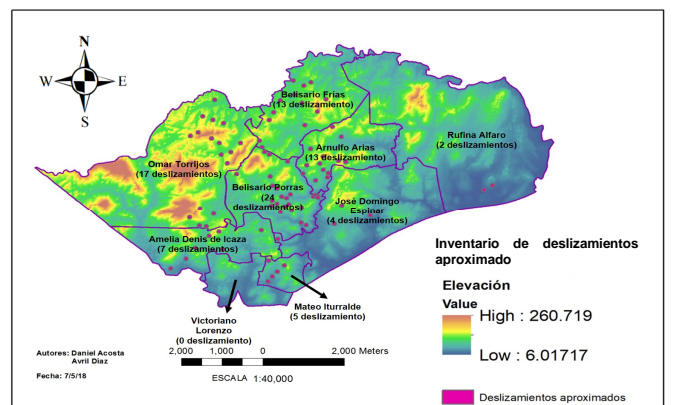


Figura 4. Mapa de inventario de deslizamientos con ubicación aproximada.

3.2 Mapas de parámetros

La degradación de los ecosistemas que regulan las cuencas, la ocupación y utilización desordenada del territorio, aunado a factores hidrometeorológicos, han ocasionado una pérdida de las capacidades regulatorias

de los ecosistemas y un aumento de la intensidad de los desastres ocurridos en San Miguelito.

Los distintos factores que alteran la estabilidad de las laderas, provocando fallas y deslizamientos, son llevados a su forma cartográfica para el análisis. De acuerdo con distintos autores [9, 13, 18, 19, 20, 21, 22], la susceptibilidad del suelo a desplazarse está mayormente relacionado con la topografía del terreno, el tipo de suelo, cuerpos de agua presentes y el uso de suelo (figura 5).

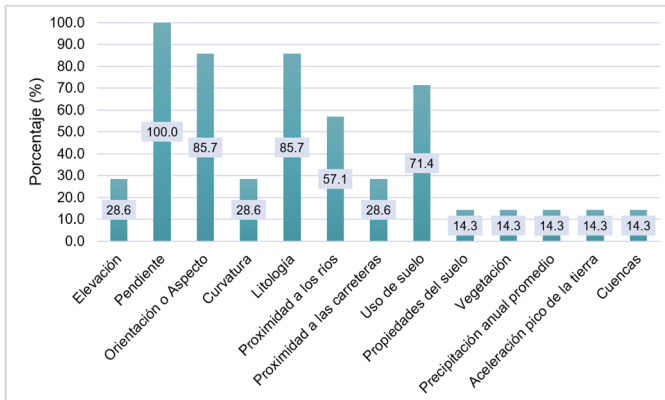


Figura 5. Frecuencia de uso de parámetros en estudios de susceptibilidad a deslizamientos por diversos autores.

Los parámetros seleccionados en este estudio son:

3.2.1 Mapa de elevaciones

A partir de un modelo digital de terreno (MDT) se obtiene la información de elevaciones absolutas (figura 6). Debido a las características topográficas de San Miguelito, se ha incorporado este parámetro al modelo con la finalidad de caracterizarlo por elevaciones.

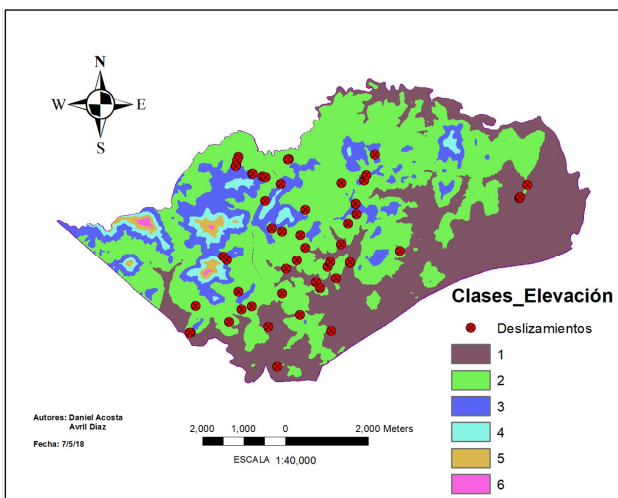


Figura 6. Mapa de elevaciones.

3.2.2 Mapa de pendientes

La pendiente de una ladera es un factor determinante en el análisis de estabilidad de taludes. Pendientes altas favorecen los movimientos de ladera por su contribución a la inestabilidad de los materiales. Este es un parámetro utilizado sistemáticamente en una gran cantidad de métodos de cálculo de estabilidad de taludes, debido a la influencia de las fuerzas gravitacionales en el proceso de falla (figura 7).

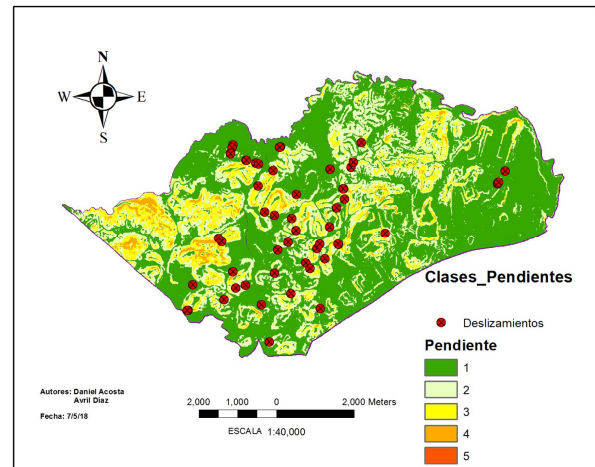


Figura 7. Mapa de pendientes.

3.2.3 Mapa de orientación de pendientes

La orientación es el ángulo que forma la línea de máxima pendiente de un elemento de la superficie del terreno con respecto al norte geográfico, medido en sentido de las agujas del reloj [23]. El mapa generado (figura 8) identifica la dirección de la pendiente descendente en un rango de 0 a 360 grados.

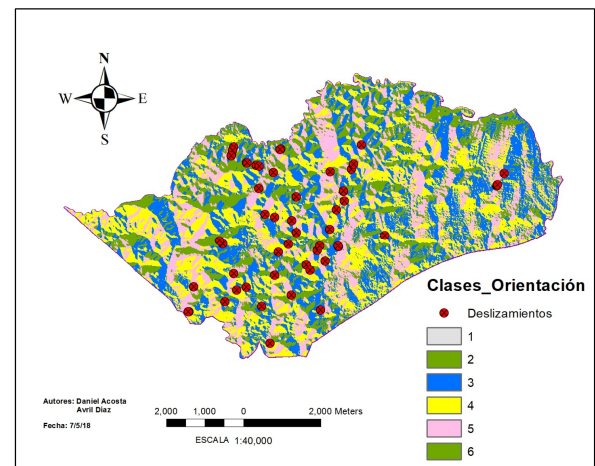


Figura 8. Mapa de orientación de pendientes.

3.2.4 Mapa de curvatura de pendientes

La curvatura representa el cálculo de la segunda derivada de los valores elevación del MDT. Los valores negativos, indican una curvatura del terreno convexa; positivo, indica una curvatura cóncava.

De acuerdo con las evidencias de los deslizamientos ocurridos y con base en estudios previos, se infiere que los terrenos con curvatura cóncava son más propensos al deslizamiento. En la figura 9 se puede apreciar el mapa de curvatura de pendientes de San Miguelito.

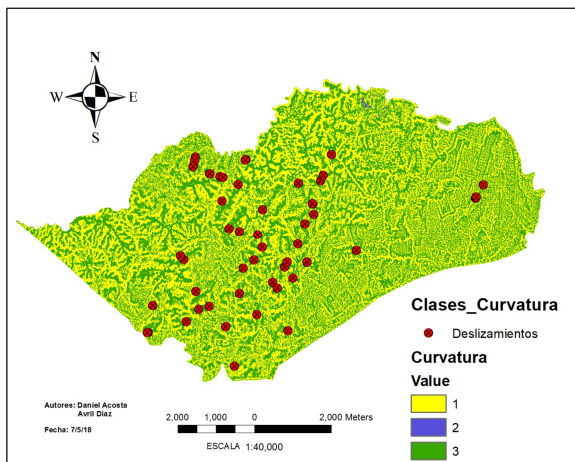


Figura 9. Mapa de curvatura de pendientes.

3.2.5 Mapa geotécnico

Un mapa geotécnico no aparece en la lista de parámetros comunes, sin embargo, se puede considerar en ausencia de mapas de tipo de suelo y de unidades litológicas si se cuenta con información sobre macizos rocosos y de propiedades geotécnicas del suelo.

El mapa geotécnico desarrollado (figura 10) se basó en la confección de una tabla de atributos con los valores de consistencia del suelo en función del valor N, a partir de los sondeos analizados.

Esto se debe a que, desde el punto de vista geotécnico, los deslizamientos ocurridos en San Miguelito son propensos a desarrollar superficies de fallas dentro de los primeros tres metros de profundidad por las características de las cargas que recibe el suelo y los intervalos lluviosos, sin embargo, se decidió realizar un estudio hasta los cinco metros con el propósito de cubrir mayor profundidad. Con el número de golpes promedio, se clasificó el suelo en diferentes categorías.

3.2.6 Mapa de proximidad a ríos

El mapa de proximidad a ríos, drenajes o cualquier tipo de cuerpo de agua es un parámetro comúnmente utilizado por diversos autores [18, 19, 20] debido a que el agua es el agente que contribuye con mayor peso a la modificación de las condiciones de estabilidad de una ladera.

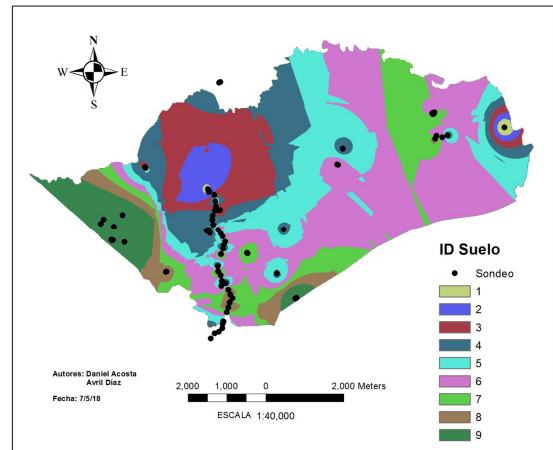


Figura 10. Mapa geotécnico.

El mapa de proximidad a los ríos (figura 11) se elabora basados en el inventario de deslizamientos y un archivo SHP de la base de datos de la Contraloría General de la Republica, que contiene toda la información de los cuerpos de agua presentes en el distrito.

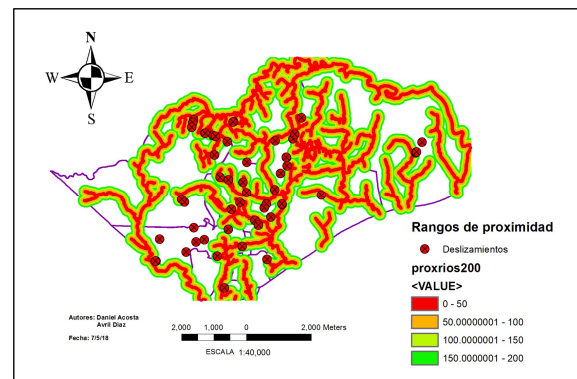


Figura 11. Mapa de proximidad a carreteras.

3.2.7 Mapa de proximidad a carretera

Las acciones antrópicas son claros modificadores de la estabilidad de una ladera, porque inducen sobrecargas ya sea en la cabeza, cuerpo o pata de esta. En San Miguelito muchos casos de deslizamientos han ocurrido

muy cerca de las vías de acceso, por este motivo se ha incluido el criterio de proximidad a carreteras (figura 12) para evaluar estadísticamente su relación espacial con los deslizamientos.

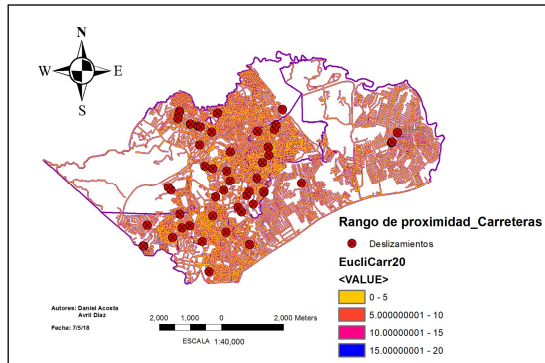


Figura 12. Mapa de proximidad a carreteras.

4. Modelo estadístico LSI

Con el fin de lograr los objetivos establecidos, y acorde con los mapas confeccionados, los resultados presentados en esta investigación para el desarrollo del mapa de susceptibilidad a deslizamiento en el distrito de San Miguelito obedecen a la metodología estadística bivariante.

La metodología bivariante a seguir es conocida como el Índice de Susceptibilidad a Deslizamiento (Landslide Susceptibility Index, LSI por sus siglas en inglés) y ha sido ampliamente utilizado por distintos autores en los trabajos [13, 18, 24] entre otros.

4.1 Formulación matemática del LSI

Este método calcula la relación de frecuencia entre la distribución de deslizamientos de tierra y los parámetros de deslizamientos. En otras palabras, cada mapa de parámetro se analiza con respecto al mapa de inventario de deslizamientos y se obtiene una razón de influencia de cada parámetro.

El LSI se calcula para cada categoría de los factores condicionantes: elevación, pendiente, aspecto, geotecnia, curvatura, proximidad a ríos y proximidad a carreteras. Por lo tanto, suponiendo que j es una categoría dentro del parámetro i , entonces el LSI para esta categoría ($LSI_{i,j}$) se define como se aprecia en la ecuación 1.

$$LSI_{i,j} = \left(\frac{N_{i,j} / N_T}{A_{i,j} / A_T} \right) \quad (1)$$

Donde:

LSI_i es la susceptibilidad de cada parámetro.

$N_{i,j}$ es el número de deslizamientos en la clase j de cada parámetro i .

$A_{i,j}$ es el área ocupada por esa clase.

N_T es el número total de deslizamientos.

A_T es el área total investigada.

La susceptibilidad total de cada píxel se puede calcular como la sumatoria de la susceptibilidad de cada parámetro entre la cantidad de parámetros que fueron tomados en cuenta en el estudio, tal como se expresa a través de la ecuación 2.

$$S = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n LSI_i \quad (2)$$

Donde: LSI_i es la susceptibilidad de cada parámetro i y n es el total de parámetros.

4.2 Cálculo del LSI

El cálculo del LSI_i fue realizado utilizando los softwares ArcMap y Microsoft Excel, para el cual se utilizaron las capas ráster de los mapas de parámetros y los deslizamientos representados por puntos (shapefile).

El inventario de deslizamiento se toma para ejecutar la función Extraer Valores Múltiples a Puntos, en ArcMap, la cual extrae valores de celda en ubicaciones especificadas en una clase de entidad de punto desde uno o más rásteres y registra los valores en la tabla de atributos de la clase de entidad de punto.

La tabla de atributos con las características de todos los puntos de deslizamiento es importada a Microsoft Excel para su procesamiento. Posteriormente, se procede a clasificar según cada uno de los parámetros utilizados de acuerdo con sus respectivas clases, las cuales corresponden a la numeración en cada uno de los mapas de parámetros elaborados (apéndice 1).

Los valores de LSI obtenidos del análisis de cada parámetro, fueron ingresados al software ArcMap para generar el mapa de susceptibilidad. Se ejecutó la función de Superposición Ponderada y se clasificó el mapa utilizando el método de interpolación de la distancia inversa pesada (Inverse Distance Weighted, IDW, por sus siglas en inglés) en siete categorías de susceptibilidad.

4.3 Categorías de susceptibilidad

Se clasificó el mapa de susceptibilidad a deslizamiento de San Miguelito de acuerdo con las clases utilizadas por Santacana [9]. Estas comprenden siete categorías enumeradas en valores enteros, para el cual el valor de 1 indica el menor grado de susceptibilidad y 7 representa la mayor susceptibilidad (tabla 4).

Tabla 4. Niveles de susceptibilidad a deslizamientos

Niveles	Descripción de la susceptibilidad
1	Extremadamente baja
2	Muy baja
3	Baja
4	Moderada
5	Alta
6	Muy Alta
7	Extremadamente alta

5. Resultados y discusiones

Se identificaron las clases de cada parámetro con la finalidad de conocer cuáles fueron los más influyentes en este caso de estudio. En la tabla 5 se muestran los valores LSI que resultaron máximos para cada uno de los parámetros estudiados.

Tabla 5. Valores LSI máximos según parámetro y clase

Mapa de Parámetro	Clase	Unidad	LSI
Geotécnico	15-20	N	2.648
Proximidad a carreteras	10-15	Metros	2.637
Proximidad a ríos	100-150	Metros	1.563
Orientación	315-360	Grados	1.378
Pendiente	30-50	%	1.373
Elevación	48.7-90.9	Metros	1.236
Curvatura	Convexa	Tipo	1.140

El parámetro geotécnico resultó matemáticamente el más influyente, donde la categoría de suelos cuya resistencia a la penetración estándar es de 15 a 20 golpes (N) resultó tener mayor valor de índice de susceptibilidad al deslizamiento. El tipo de suelo que se identifica con esta categoría es un suelo muy compacto, según descripciones del REP (2014). Para este estudio, un 8.33% de los suelos de San Miguelito se ubican dentro de

esta clasificación geotécnica. Cabe destacar que los suelos con estas características (N entre 15 y 20 golpes) no son suelos malos, sin embargo, son suelos que requieren más de un ensayo SPT para establecer sus propiedades geotécnicas, ya que se caracterizan por ser hidrofóbicos, aspecto que no es identificable al realizar un ensayo SPT.

Los resultados de proximidad a carreteras reflejan que la relación de frecuencia es alta para la clase de 10-15 metros, indicando que la ocurrencia de deslizamientos para el área de estudio se ve influenciada por este parámetro.

La frecuencia en la ocurrencia de deslizamientos es mayor para aquellos puntos que se ubican a una distancia de 100 a 150 metros de un cuerpo de agua. A pesar de que no exista cercanía considerable para deducir que existe socavación por caudal y aumentos del nivel del agua, se infiere que los drenajes y la escorrentía aportan a la influencia de este parámetro sobre la ocurrencia de los deslizamientos en San Miguelito.

Los parámetros geométricos del terreno resultaron con menor grado de influencia en la susceptibilidad, en el que se destaca que los deslizamientos de tierra han ocurrido incluso en pendientes no muy pronunciadas (30% a 50%).

5.1 Susceptibilidad por categorías

Se obtuvo una susceptibilidad moderada en un 46% de la región de San Miguelito (figura 13), cuya predominancia se encuentra en los corregimientos de Amelia Denis de Icaza y Rufina Alfaro.

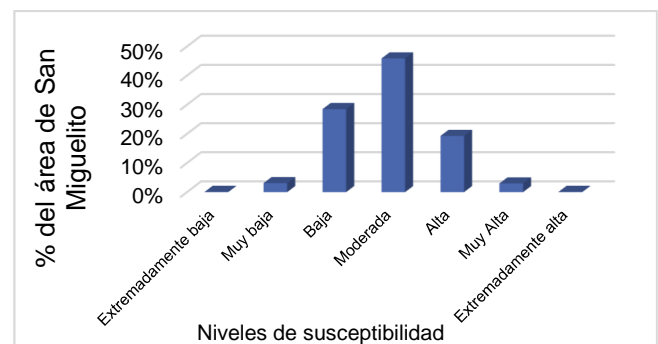


Figura 13. Gráfico de los niveles de susceptibilidad al deslizamiento y su distribución territorial en el distrito de San Miguelito.

Para efectos de vulnerabilidad a deslizamiento, se puede categorizar como zonas susceptibles a aquellas

regiones cuyas categorías se encuentran en el rango de moderada a extremadamente alta, lo cual resultaría en aproximadamente 68% de todo el territorio de San Miguelito. Esto es una evidencia que año tras año se observa en los medios de comunicación con los constantes deslizamientos que son reportados en esta región.

5.2 Validación

El proceso de validación se realizó utilizando el inventario de deslizamiento aproximado. Para esto, se calculó la cantidad de píxeles de los polígonos del inventario que caen dentro de cada clase de susceptibilidad. Se realizó esta metodología sencilla debido al grado de precisión en cuanto a la ubicación de los polígonos que conforman este inventario.

Tomando como válido el hecho de que estos deslizamientos con ubicación aproximada se localizan efectivamente dentro de un radio de 50 metros de acuerdo con la descripción dada por Desinventar, resulta que el mapa de susceptibilidad generado a partir del inventario de alta precisión predice en un 88% la existencia de una zona de alta susceptibilidad en el área de estudio.

5.3 Zonificación por corregimientos

A partir del inventario de deslizamientos se observó que los corregimientos de Omar Torrijos, Belisario Porras, Amelia Denis de Icaza y Arnulfo Arias concentran la mayor cantidad de deslizamientos reportados. Recalcando el hecho de que un inventario de deslizamiento es también una forma preliminar de analizar la susceptibilidad al deslizamiento por zonas, los resultados del modelo desarrollado en esta investigación confirman que los corregimientos antes mencionados, junto con el corregimiento de Belisario Frías, son los más susceptibles a deslizamiento de todo el distrito. Por otro lado, se identifican a los corregimientos menos susceptibles del distrito, que corresponden a los corregimientos de Mateo Iturralde, Victoriano Lorenzo y Rufina Alfaro.

6. Conclusiones

Este proyecto desarrolló y validó un mapa de susceptibilidad al deslizamiento en el distrito de San Miguelito (apéndice 2) siguiendo una metodología estadística bivariable e implementando el uso de los Sistemas de Información Geográfica. El mapa resultante permitió comprobar que San Miguelito es susceptible a

deslizamientos de tierra, lo cual también queda reflejado por los datos de Desinventar, que lo han posicionado como el distrito con mayor cantidad de deslizamientos del país.

Del análisis de este estudio se concluye:

1. Los métodos estadísticos son considerados los más apropiados para la zonificación de la susceptibilidad al deslizamiento a escalas regionales porque son objetivos, reproducibles y fácilmente actualizables. No obstante, se requiere de la disposición de mucha información para su óptimo desarrollo.

2. El modelo LSI utilizado en esta investigación es un método simple; el proceso de entrada, cálculo y resultados se puede entender fácilmente y permiten asociarlo al entorno SIG, permitiendo el trabajo con gran cantidad de datos de forma efectiva para la creación de mapas de susceptibilidad a deslizamiento.

3. Para futuras investigaciones, se sugiere confeccionar también un mapa basado en métodos geomorfológicos, con la finalidad de establecer comparaciones entre ambos resultados.

4. Utilizar otros parámetros geotécnicos además del ensayo SPT, tales como el ángulo de fricción interna y la cohesión, los cuales influyen directamente en la resistencia al corte de la masa de suelo.

5. Se recomienda utilizar el mapa de susceptibilidad a deslizamiento desarrollado en esta investigación para tomar las medidas necesarias de prevención de eventos de derrumbe y así contribuir en la formulación y consolidación de acciones urbanísticas, de modo que a mediano y largo plazo se obtenga un uso apropiado de los recursos naturales y se proteja la vida de la población en general.

7. Agradecimiento

Agradecemos al Ing. Luis Alfaro e Ing. Bella Almillategui, de la empresa Ingenieros Geotécnicos S.A.; al Metro de Panamá y al Departamento de Geotecnia del Centro Experimental de Tocumen, por brindarnos información geotécnica valiosa. Agradecemos también al Dr. Martín Candanedo, por los datos proporcionados; a la Ing. Diana Laguna y al Dr. Bobak Karimi, por su apoyo sobre el entendimiento de SIG.

8. Referencias

[1] The World Bank. "Disaster Risk Management in Latin America and the Caribbean Region: GFDRR Country Notes." Sustainable Development Unit, pp. 20, 2014.

- [2] DesInventar. "Sistema de inventario de efecto de desastres." Disponible: <https://www.desinventar.org/es/database>. Consultado el 21 de agosto de 2018.
- [3] B. Bacic y M. Uljarevic. "Slope Stability Analysis". Journal of Faculty of Civil Engineering, Subotica, Serbia, pp. 379-384, 2014.
- [4] D. J. Varnes. "Slope Movement Types and Processes." Analysis and Control, National Research Council, Washington DC, Transportation Research Board, Special Report 176, National Academy Press, Washington DC, pp. 11-33, 1978.
- [5] Contraloría General de la Republica. "Censo 2010". Disponible: <http://www.censos2010.gob.pa/Resultados/Cuadros.aspx>. Consultado el 21 de agosto de 2018.
- [6] C. Venkataramaiah. "Geotechnical Engineering." New Age International Publishers, third edition, New Delhi, pp. 318, 2006.
- [7] Y. Cruz y V. Medina. "Evaluación de áreas vulnerables y de fallas en algunos taludes en el distrito de San Miguelito." Trabajo de tesis de pregrado, Universidad Tecnológica de Panamá, 1994.
- [8] D. Barria y M. Motta. "Evaluación del riesgo por deslizamiento de tierras del distrito de San Miguelito." Trabajo de tesis de pregrado, Universidad Tecnológica de Panamá, 1993.
- [9] N. Santacana, B. Baeza, A. De Paz, J. Marturiá. "A GIS-Based Multivariate Statistical Analysis for Shallow Landslide Susceptibility Mapping in La Pobla de Lillet Area (Eastern Pyrenees, Spain)." Kluwer Academic Publishers, Vol. 30, pp. 281, 2003.
- [10] C.F. Mahler, E. Varanda y L. C. De Oliveira. "Analytical Model of Landslide Risk Using GIS." Open Journal of Geology, pp. 7, 2012.
- [11] D. J. Varnes. "Landslide hazard zonation: a review of principle and practices." Paris: UNESCO, 1984.
- [12] SIMDE/GTZ. "Guía para la gestión local de deslizamientos." San Salvador, 2007.
- [13] C. Chalkias, M. Ferentinou y C. Polykretis. "GIS-Based Landslide Susceptibility Mapping on the Peloponnese Peninsula, Greece." Geosciences, edición 4, pp. 15, 2014.
- [14] T. Glade y M. Crozier. "A Review of Scale Dependency in Landslide Hazard and Risk Analysis." Landslide Hazard and Risk, Wiley, pp. 102, 2005.
- [15] E. Brabb y B. Harrod. Landslides: Extent and Economic Significance. Proceedings of the 28th international geologic congress symposium on landslides. Washington D.C., 1989.
- [16] J. Suarez. "Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales." Ingeniería de Suelos Ltda: Publicaciones UIS, Instituto de Investigaciones sobre Erosión y Deslizamientos, Bucaramanga, Colombia, pp. 358, 1998.
- [17] N. Santacana. "Análisis de la susceptibilidad del terreno a la formación de deslizamientos superficiales y grandes deslizamientos mediante el uso de sistemas de información geográfica. Aplicación a la cuenca alta del río Llobregat." Barcelona, España: Universidad Politénica de Catalunya, 2001.
- [18] S. Lee. "Application of logistic regression model and its validation for landslide susceptibility mapping using GIS and remote sensing data." International Journal of Remote Sensing; Vol. 26, pp. 1477-1491, 2005.
- [19] A. Akgun, C. Kincal y P. Biswajeet. "Application of remote sensing data and GIS for landslide risk assessment as an environmental threat to Izmir city (west Turkey)." Environmental Monitoring and Assessment, vol. 184, pp. 5453-5470, 2012.
- [20] P. Magliulo, A. Di Lisio y F. Russo. "Comparison of GIS-based methodologies for the landslide susceptibility assessment." Geoinformatica, vol. 13, pp. 253-265, 2008.
- [21] A. Nisa y W. Mohd. "GIS Based Multi-Criteria Decision Making for Landslide Hazard Zonation." Social and Behavioral Science, Vol. 35, pp. 595-602, 2012.
- [22] H. Sato y T. Sekiguchi. "Landslide Susceptibility Mapping of the Kuchisakamoto Area, Central Japan using DTM from Airborne LiDAR." Bulletin of the Geographical Survey Institute, pp. 23-35, 2005.
- [23] J. Jiménez. "Análisis de la susceptibilidad a los movimientos de ladera mediante un SIG en la cuenca vertiente al embalse de Rules, Granada." Tesis doctoral, Universidad de Granada, Departamento de Ingeniería Civil, Granada, 2005.
- [24] Y. W. Wenping Li, Q. Wang, Q. L. Liu, D. Yang, M. Xing, Y. Pei y S. Yan. "Landslide susceptibility assessment using frequency ratio, statistical index and certainty factor models for the Gangu County, China." Arabian Journal of Geosciences, vol. 9, pp. 84, 2016.

Apéndice 1. Tabla de relación de frecuencia en la ocurrencia de deslizamientos (LSI) por cada parámetro.

Parámetro	ID clase	Rango de la clase	Deslizamiento	Deslizamiento (%)	Píxeles totales de la clase	Píxeles totales de la clase (%)	Frecuencia (LSI)
Elevación (m)	1	6.0 - 48.7	14	0.259	704981	0.353	0.734
	2	48.7 - 90.9	32	0.593	957005	0.480	1.236
	3	90.9 - 133.4	8	0.148	248823	0.125	1.188
	4	133.4 - 175.8	0	0.000	61750	0.031	0.000
	5	175.8 - 218.3	0	0.000	19435	0.010	0.000
	6	218.3 - 260.7	0	0.000	3448	0.002	0.000
Pendiente (%)	1	0 - 15	28	0.519	1181815	0.592	0.875
	2	15 - 30	16	0.296	526766	0.264	1.122
	3	30 - 50	9	0.167	242276	0.121	1.373
	4	50 - 100	1	0.019	44443	0.022	0.831
	5	> 100	0	0.000	142	0.000	0.000
Orientación	1	Plano	0	0.000	973	0.000	0.000
	2	Norte	7	0.130	223856	0.112	1.156
	3	Este	12	0.222	555871	0.279	0.798
	4	Sur	13	0.241	547558	0.274	0.877
	5	Oeste	14	0.259	452722	0.227	1.143
	6	Norte	8	0.148	214462	0.107	1.378
Curvatura	1	Convexa	32	0.593	1036976	0.520	1.140
	2	Plano	0	0.000	1078	0.001	0.000
	3	Cóncavo	22	0.407	957388	0.480	0.849
Geotécnico (N)	1	5 - 10	0	0.000	6757	0.003	0.000
	2	10 - 15	1	0.019	66954	0.034	0.552
	3	15 - 20	16	0.296	223306	0.112	2.648
	4	20 - 25	3	0.056	242965	0.122	0.456
	5	25 - 30	17	0.315	356784	0.179	1.761
	6	30 - 35	13	0.241	646435	0.324	0.743
	7	35 - 40	2	0.037	238788	0.120	0.310
	8	40 - 45	2	0.037	76449	0.038	0.967
	9	45 - 50	0	0.000	137104	0.069	0.000
Proximidad a ríos (m)	1	0 - 50	10	0.185	461232	0.231	0.801
	2	50 - 100	13	0.241	385871	0.193	1.245
	3	100 - 150	14	0.259	331026	0.166	1.563
	4	150 - 200	5	0.093	285100	0.143	0.648
	5	> 200	12	0.222	532313	0.267	0.833
Proximidad a carreteras (m)	1	0 - 5	12	0.222	411157	0.206	1.078
	2	5 - 10	13	0.241	226493	0.114	2.121
	3	10 - 15	16	0.296	224225	0.112	2.637
	4	15 - 20	8	0.148	157030	0.079	1.883
	5	>20	5	0.093	976637	0.489	0.189

Apéndice 2. Mapa de susceptibilidad a deslizamientos en el distrito de San Miguelito.

