

Determinación de áreas susceptibles a deslizamientos en el corregimiento de Cerro Punta, provincia de Chiriquí, Panamá

Determination of susceptible areas to landslides in Cerro Punta township, Chiriquí province, Panama

Tomás Santamaría^{1*}, Marissa Samudio¹, Deeyvid Sáez²

¹Licenciatura en Ingeniería Geológica, Campus Dr. Víctor Levi Sasso, Universidad Tecnológica de Panamá, ²Facultad de Ingeniería Civil, Campus Dr. Víctor Levi Sasso, Universidad Tecnológica de Panamá

Resumen El corregimiento de Cerro Punta se encuentra en una zona geodinámicamente activa, tanto internamente como externamente. Esto, combinado con las acciones antrópicas, hace que las amenazas a deslizamientos de tierra sean recurrentes en esta zona, causando pérdidas de vidas humanas y económicas. Tomando en cuenta esta problemática, se realizó un estudio de áreas susceptibles a deslizamientos aplicando el método de índice de susceptibilidad a deslizamientos (LSI), con su respectiva validación. El método de LSI es un modelo estadístico bivariado que utiliza como datos de entrada un inventario de deslizamientos históricos y una serie de parámetros que condicionan la ocurrencia de deslizamientos de tierra. El estudio contó con un inventario de 68 deslizamientos georreferenciados, con los cuales se desarrolló y validó un mapa de susceptibilidad a deslizamientos en la zona de estudio. Del inventario total, 30 deslizamientos fueron utilizados para aplicar el modelo estadístico y 38 para validarlo (23 de estos 38 ocurrieron durante el paso del huracán Eta). Para el modelo estadístico se analizaron 9 mapas de parámetros elaborados en ArcGIS, a fin de conocer el nivel de influencia de cada parámetro, resultando la proximidad a carreteras como el parámetro más influyente. Posteriormente, se utilizó la herramienta de superposición ponderada de ArcGIS para realizar el mapa de susceptibilidad, generando 5 niveles de susceptibilidad. La validación del mapa arrojó un 89.4% de predicción, lo que aporta información relevante para la toma de decisiones en gestión de riesgos, planificación urbana en el área de estudios e investigaciones futuras.

Palabras clave Cerro Punta, deslizamientos, mapa de susceptibilidad, método estadístico bivariado.

Abstract Cerro Punta township is in a geodynamically active area, which combined with anthropic actions makes the threats to landslides recurrent in this area, causing human deaths and economic losses. Based on this problem, a study of susceptible areas to landslides was conducted using the landslide susceptibility index (LSI) method and its further validation. The LSI method is a bivariate statistical model that uses as input data an inventory of historical landslides and parameters, which determine occurrence of landslides. An inventory of 68 georeferenced landslides was used; from this data, a landslide vulnerability map was developed in the study area. A total of 30 of the 68 landslides were used to apply the statistical model and the remaining 38 were used to validate the model, (23 of the 38 landslides data used for validation occurred during the passage of Hurricane ETA). With the statistical model, 9 parameter maps were developed using the software ArcGIS to determine the level of influence of each parameter in the occurrence; the results show that the proximity of streets parameter was the most influential. The ArcGIS weighted overlay tool was used to develop the susceptibility map, which generated 5 levels of susceptibility. Finally, the results of the validation show that the map was able to predict 89.4% of the landslides; which provides relevant information for decision-making in landslide risk management, for urban planning and future research in the study area.

Keywords Cerro Punta, landslides, susceptibility map, bivariate statistical method.

* Corresponding author: dsaez2110@gmail.com

1. Introducción

El deslizamiento de tierra es un proceso de degradación natural y uno de los factores más importantes de construcción del paisaje [1]. Un deslizamiento ocurre cuando se rompe el equilibrio de los materiales que componen una ladera y se deslizan ladera abajo por acción de la gravedad. Como los deslizamientos son procesos que tienen lugar en la superficie

terrestre (lugar de ocupación y desarrollo de las principales actividades humanas), los mismos provocan cambios en las condiciones de la superficie, clasificando a los deslizamientos como uno de los riesgos de origen geológicos más extendidos en el mundo. Consecuentemente, éstos causan cada año miles de pérdidas, heridos y muertos a nivel mundial.

La mayoría de los eventos adversos ocurridos en Panamá durante los últimos años, catalogados como desastres, han sido del tipo meteorológico [2]. Como consecuencia de estas

perturbaciones atmosféricas, los deslizamientos de tierra, en conjunto con las inundaciones, han provocado pérdidas de vidas y deterioro de las economías de las personas que han sido afectadas. En Panamá, Chiriquí ha sido una de las provincias más afectadas por fenómenos naturales como inundaciones y deslizamientos, correspondiendo estos a un 10,5 % y 26% del total, respectivamente [3].

Históricamente, la combinación de eventos de altas precipitaciones y laderas vulnerables han sido titulares de noticias lamentables en esta provincia, situaciones como la del 17 de agosto del 2014, fecha relacionada a un evento de lluvias acumuladas que ocasionaron un deslizamiento que causó 9 muertos y 200 personas damnificadas. Y sucesos más recientes, específicamente en noviembre 2020, las lluvias asociadas a la tormenta tropical ETA causaron daños a las carreteras principales hacia Cerro Punta y hacia Bocas del Toro, sin contar con las pérdidas de viviendas y los miles panameños afectados.

Considerando esta problemática tan recurrente en la zona de Cerro Punta, se realiza esta investigación a fin de determinar las áreas de la región más susceptibles a deslizamientos, las cuales son presentadas a través de un mapa que define 5 niveles de susceptibilidad. Este mapa de susceptibilidad se elaboró mediante un método estadístico bivariado, conocido como índice de susceptibilidad a deslizamientos (LSI, por sus siglas en inglés), y con sistemas de información geográfica. El mapa tiene la finalidad de identificar zonas susceptibles a deslizamientos en el corregimiento de Cerro Punta, según los niveles definidos, a fin de aportar información importante en materia de prevención y control de riesgos.

1.1 Área de estudio

El área de estudio es el corregimiento de Cerro Punta, ubicado en la provincia de Chiriquí. Cerro Punta es el pueblo de mayor elevación en Chiriquí, con una altitud de unos 2000 m sobre el nivel del mar. Se encuentra en el lado Pacífico en las tierras altas de la Cordillera de Talamanca y en la ladera del Volcán Barú, el volcán más joven del país [4].

La zona de Cerro Punta presenta una precipitación significativa, incluso durante el mes más seco. Este clima es considerado Oceánico templado (verano suave Cfb), según la clasificación climática de Köppen-Geiger. La temperatura media anual es de 15.7 °C y la precipitación en un año alcanza valores de 2295 mm [5]. La zona de estudio es de gran importancia socioeconómica para el país debido a la gran producción agropecuaria, especialmente en cultivos de hortalizas, legumbres, café, frutales y producción de leche.

A la condición existente de altas precipitaciones se adiciona la degradación del suelo por la deforestación, y la agricultura y ganadería poco sostenible, que en combinación de estos y otros factores conlleva a que se presenten numerosos deslizamientos en la zona.

1.2 Definición de deslizamiento y su relación con el concepto de susceptibilidad

Se define deslizamiento de una ladera como un término general para designar el movimiento de los materiales téreos de un talud, que resultan de un desplazamiento hacia abajo y hacia afuera de suelos, rocas y vegetación, bajo la influencia de la gravedad [6].

La fuerza de la gravedad puede desplazar los materiales téreos sólo cuando tiene la capacidad de vencer la resistencia del material que le impide moverse. Puede decirse, entonces, que cualquier factor que reduzca la resistencia del material hasta el punto donde la gravedad pueda intervenir, contribuye al deslizamiento de tierra. Dependiendo de cómo actúan, los factores se clasifican en dos grupos: a) condicionantes y, b) desencadenantes. Los primeros, también conocidos como pasivos o intrínsecos, son aquellos que dependen de la naturaleza, estructura y forma del terreno, mientras que los segundos, también llamados activos o externos, son factores que actúan desde fuera del medio que se estudia, provocando o desencadenando un deslizamiento [7]. Estos factores dan origen al término de susceptibilidad a deslizamientos que puede definirse como la favorabilidad del ambiente físico y de los elementos inherentes de las masas de terreno y superficie, como la geología, pendiente, geomorfología, usos del suelo, entre otros, a la ocurrencia de deslizamientos.

La susceptibilidad es un indicador de la predisposición del terreno a deslizarse, pero no implica el aspecto temporal del mismo [1]. Entre más se conozca y se entienda cómo afectan estos factores desencadenantes y condicionantes la estabilidad o inestabilidad de una ladera, se tendrán más elementos para distinguirlos en campo, para evaluar el grado o la magnitud del peligro, y tomar medidas de prevención o de evacuación necesarias [8].

1.3 Mapas de susceptibilidad

Los mapas de susceptibilidad a deslizamientos fueron desarrollados por primera vez, por Brabb en el condado de San Mateo, California, para el United States Geological Survey (USGS), en 1978. Los primeros mapas se realizaban superponiendo capas con los diferentes factores geológicos que influían en las fallas de los taludes (zonas donde comienza el deslizamiento de laderas) [7].

Se define un mapa de susceptibilidad a deslizamiento como un mapa en el cual se zonifica las unidades de terreno que muestran una actividad de deslizamientos similar o de igual potencial de inestabilidad. La susceptibilidad resulta del producto de la correlación de algunos de los principales parámetros que contribuyen al deslizamiento de tierras con la distribución pasada de fallas de taludes [9]. La elaboración de un mapa categorizado de susceptibilidad a deslizamientos implica desarrollar un inventario histórico de deslizamientos con una evaluación de las posibles áreas en las que se podrían experimentar deslizamientos de tierra en el futuro, pero sin la evaluación de la frecuencia (probabilidad anual) del acontecimiento.

Las técnicas para realizar predicciones de las áreas susceptibles a deslizamientos pueden dividirse en dos grupos: métodos cualitativos y métodos cuantitativos.

Los métodos cualitativos se basan en el conocimiento e incorporan la experiencia específica de quien determina el grado y susceptibilidad a la presencia de movimientos en masa, combinando mapas, capas u otra información que sea clave para la caracterización del deslizamiento, como son procesos de jerarquía analítica y análisis heurístico (análisis geomorfológico y combinación cuantitativa de mapas) [10]. Los métodos cuantitativos incorporan el análisis estadístico y probabilístico, o siguen enfoques deterministas, los cuales se pueden agrupar en modelos probabilísticos basados en teoría bayesiana, modelos estadísticos basados en análisis de correlación y en estadística espacial, y modelos de aprendizaje automático los cuales en los últimos años han tomado mayor relevancia, como se observa en la figura 1.

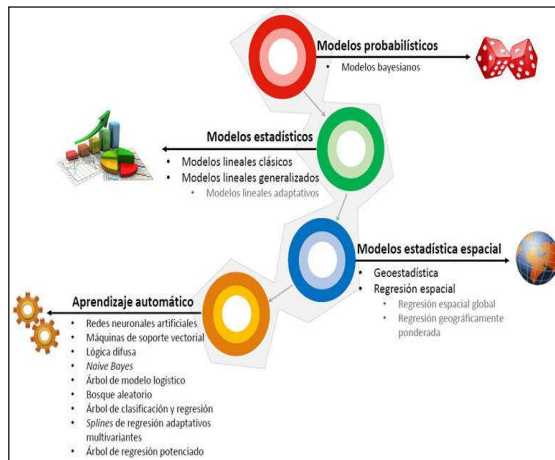


Figura 1. Técnicas cuantitativas para predecir áreas susceptibles a deslizamientos.

Fuente: (Florez-García & Pérez-Castillo, 2018).

2. Materiales y métodos

2.1 Metodología

El método seleccionado para realizar el mapa de las áreas susceptibles a deslizamiento en el corregimiento de Cerro Punta es el método de índice de susceptibilidad a deslizamiento, con siglas LSI por su nombre en inglés *Landslide Susceptibility Index*, el cual es un método estadístico lineal clásico bivariado. El análisis estadístico bivariado es el modelo matemático más simple para el mapeo de susceptibilidad a deslizamiento, pero arroja información valiosa para comprender la ocurrencia de estos. Los factores de inestabilidad de deslizamiento tales como el ángulo de la pendiente, el tipo de suelo, el uso de suelo, la cobertura boscosa, etc., se asumen como variables independientes condicionantes de la susceptibilidad a deslizamientos que no se relacionan internamente [11]. Cada clase de variable se combina con la distribución de los deslizamientos en el área

estudiada, y los pesos o valores de ponderación se calculan de acuerdo con la cantidad de deslizamientos contenidos por cada clase de variable.

Considerando que lo antes expuesto resulta un criterio subjetivo de quien realiza la selección, en este sentido, se han propuesto técnicas que estandaricen el proceso de selección de variables y pesos por cada clase de variable, comparando y evaluando los resultados obtenidos de aplicar cada una de ellas [9].

Finalmente, la suma de los puntajes de todos los factores que condicionan los deslizamientos da como resultado un mapa de valor numérico, el cual se puede dividir en rangos para definir diferentes niveles de susceptibilidad [11].

2.2 Datos

Para realizar el mapa de susceptibilidad se requiere de información de partida que consiste en el inventario histórico de deslizamientos en área de estudio y, según técnicas del método estadístico bivariado, la identificación de los factores condicionantes y desencadenantes que inciden en los deslizamientos de tierra.

La información requerida fue presentada por medio de mapas realizados con el programa ArcGIS PRO que utiliza los sistemas de información geográfica. Los parámetros seleccionados para realizar el mapa de susceptibilidad fueron: precipitación, proximidad a ríos, proximidad a calles, cobertura boscosa y uso de suelo, elevación del terreno, pendientes, orientaciones, proximidad a fallas y curvatura.

2.2.1 Inventario histórico de deslizamientos

Las investigaciones previas a la elaboración de mapas de susceptibilidad se basan en recopilar y analizar la mayor cantidad de información disponible relacionada a los movimientos de laderas (noticias, periódicos, radio, etc.).

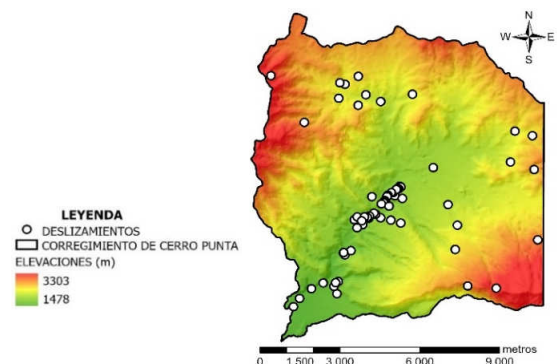


Figura 2. Inventario histórico de deslizamientos. Fuente: SINAPROC, FUNDICEPP y (Gálvez Hopper, 2010).

En el mapa de inventario (ver figura 2) presentamos los deslizamientos históricos obtenidos mediante documentos y otros obtenidos en campo. En total se obtuvieron 68

deslizamientos, de los cuales 30 se utilizaron para calcular los valores de LSI y, posteriormente, realizar el mapa de susceptibilidad y 38 se utilizaron para validar el mapa (23 deslizamientos de los 38 causados durante el paso del huracán ETA).

2.2.2 Precipitación

Uno de los factores externos que más contribuye a la inestabilidad de laderas es la lluvia; por el efecto que tiene en la saturación del terreno, con la lluvia aumenta el peso volumétrico del suelo y, de manera relevante, ocasiona la reducción de la resistencia al esfuerzo cortante de los suelos; además, las corrientes extraordinarias por el pie de las laderas propician socavación, deslaves y cambios en la su geometría [9]. Para realizar el mapa de precipitaciones mostrado en la figura 3, se promedió la precipitación anual en milímetros de tres estaciones meteorológicas con un registro de 1986-2000.

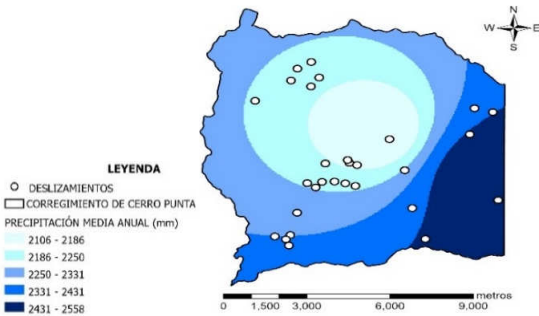


Figura 3. Mapa de Precipitaciones.

2.2.3 Proximidad a ríos

El factor de la proximidad a ríos al pie de las laderas es el factor desencadenante más usual relacionado con la generación de deslizamientos, especialmente en las zonas de intensa morfología y redes de drenaje densas [11]. Para el mapa de proximidad a ríos presentando en la figura 4 se utilizó una distancia máxima de 200 metros para este análisis, tomando en cuenta posibles crecidas o zonas de influencia del río hacia la ladera.

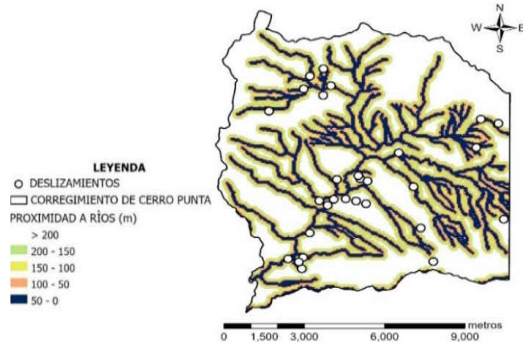


Figura 4. Mapa de proximidad a río.

2.2.4 Cobertura boscosa y uso de suelo

La importancia del factor de uso de suelo radica en la capacidad de interceptación de humedad que tiene la vegetación en función de su tipo, densidad, área de cobertura, etc., constituyendo un factor de resistencia o favorecimiento a los procesos morfodinámicos como la erosión y los movimientos de masa [11]. La clasificación que se observa en el mapa de la cobertura boscosa y uso de suelo de la figura 5 fue basada en el sistema de clasificación de la cobertura y uso de la tierra para el sistema nacional de monitoreo de los bosques del Ministerio de Ambiente en el 2014.

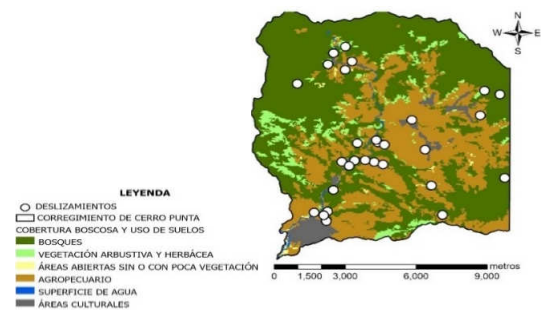


Figura 5. Mapa de parámetro de cobertura boscosa y uso de suelo.

2.2.5 Proximidad a calles

El impacto de las acciones antrópicas tiene una gran importancia en la ocurrencia de deslizamientos ya que al modificar las condiciones de equilibrio del terreno es vital que este regrese a dicha condición para así reducir futuros deslizamientos. En Cerro Punta la proximidad a carreteras juega un papel muy importante en los deslizamientos ya que gran parte de estos se encuentran bastante cerca de carreteras. La figura 6 muestra el mapa de este parámetro para el corregimiento de Cerro Punta.

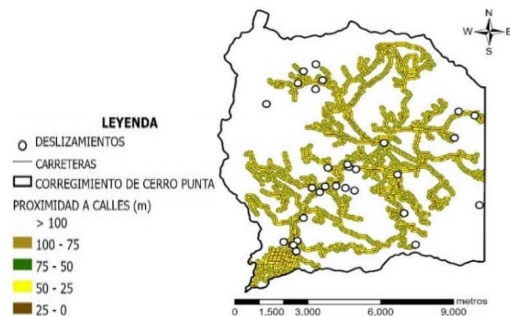


Figura 6. Mapa de parámetro de proximidad a calles.

2.2.6 Elevaciones

Para la realización del mapa de elevaciones del corregimiento de Cerro Punta (ver figura 7) se tomó un modelo digital del terreno (MDT). Este es una representación visual y matemática del valor de la altura en relación con el nivel medio

del mar, que puede caracterizar la forma del relieve y los elementos u objetos presentes en él. La inclusión de este mapa se debe a las notables diferencias de alturas que tiene este corregimiento.

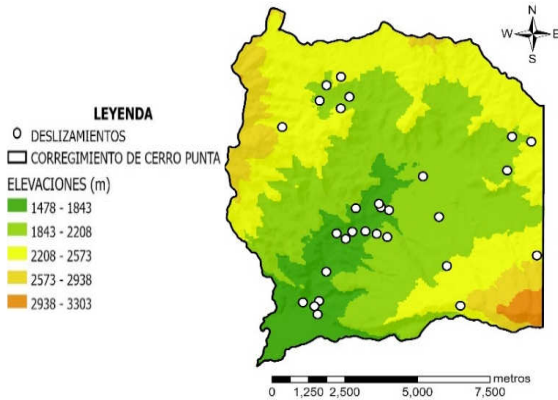


Figura 7. Mapa de parámetro de elevaciones.

2.2.7 Pendientes

La pendiente de una ladera es un factor importante en el análisis de estabilidad de taludes. Altas pendientes favorecen los movimientos de ladera por su contribución a la inestabilidad de los materiales. Este es un parámetro ampliamente utilizado en métodos de cálculo de estabilidad de taludes, debido a la influencia de las fuerzas gravitacionales en el proceso de falla [12]. La figura 8 muestra el mapa de este parámetro para el área de estudio.

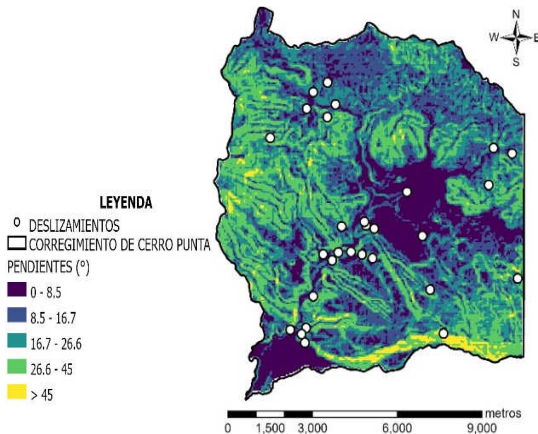


Figura 8. Mapa de parámetro de Pendientes.

2.2.8 Orientación de pendientes

Es la dirección a la que tiende la pendiente del terreno. Se mide por la dirección de la pendiente (en dirección perpendicular a las líneas de nivel), y respecto del norte geográfico. Dado que rara vez se encuentra disponible información sobre los niveles freáticos y sus fluctuaciones, la

cartografía de medidas indirectas tales como la vegetación y orientación de pendientes pueden revelar la influencia de la hidrología sobre un área [13]. La figura 9 muestra el mapa de este parámetro para el área de estudio.

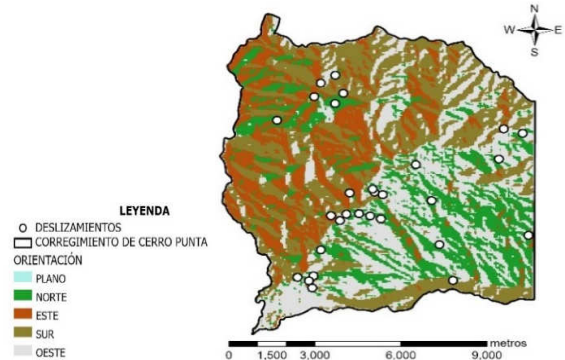


Figura 9. Mapa de parámetro de orientación de pendientes.

2.2.9 Proximidad a fallas geológicas

Los graves daños causados por deslizamientos usualmente están restringidos a una zona angosta, de hasta unos 300 metros de ancho a lo largo de la falla, aunque rupturas subsidiarias pueden ocurrir hasta 3 o 4 kilómetros distantes de la falla principal [13]. Debido a que esta área se encuentra en una zona altamente sísmica, el análisis de las distancias de fallas mostrado en la figura 10 juega un papel fundamental en el análisis.

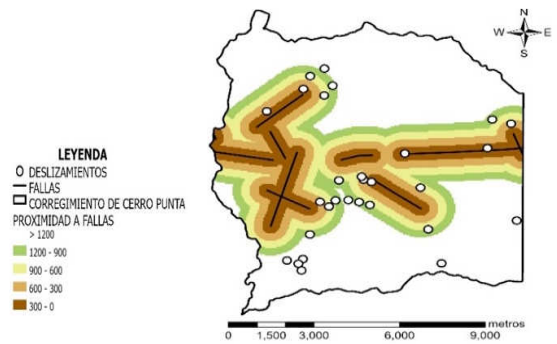


Figura 10. Mapa de parámetro de proximidad a fallas geológicas.

2.2.10 Curvatura

La curvatura se puede utilizar para describir las características físicas de una cuenca de drenaje para intentar entender los procesos de erosión y escorrentía. De acuerdo con las evidencias de los deslizamientos ocurridos y con base a estudios previos, se infiere que los terrenos con curvatura cóncava son más propensos al deslizamiento [12] (ver figura 11).



Figura 11. Mapa de parámetro de Curvatura.

2.3 Índice de susceptibilidad a deslizamiento (LSI)

Este método calcula la relación de frecuencia entre la distribución de deslizamientos de tierra y los parámetros seleccionados como influyentes en la ocurrencia 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 [14].

Para cada factor condicionante que está dividido en categorías o clases, se calcula el LSI para cada valor, por lo tanto, suponiendo que m es una categoría dentro del parámetro n , entonces el LSI para esta categoría ($LSI_{m,n}$) se define como:

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

Donde: $N_{m,n}$ es el número de deslizamientos en la clase m de cada parámetro n , $A_{m,n}$ es el área ocupada por esa clase, N_T es el número total de deslizamientos y A_T es el área total investigada. La susceptibilidad de cada píxel del mapa se calcula como la sumatoria de las susceptibilidades de cada parámetro entre la cantidad de parámetros elegidos para la elaboración del mapa. La susceptibilidad queda definida en la ecuación (2) como:

$$S = \frac{1}{n} \sum LSI_m \quad (2)$$

El cálculo del LSI_m fue elaborado por medio de herramientas del programa ArcGIS PRO y hojas de cálculo de Microsoft Excel. De los mapas realizados en ArcGIS PRO en formato ráster, se extrajeron los valores de los píxeles que representan el área total estudiada, el área de cada clase de cada parámetro, la cantidad de deslizamiento en cada categoría de cada parámetro, y la cantidad total de deslizamiento.

Estos valores de píxeles fueron exportados a Microsoft Excel para aplicar las ecuaciones. Para elaborar el mapa de susceptibilidad, se utilizaron los valores de LSI de cada parámetro y se ponderaron dependiendo de los valores de LSI. Los parámetros con mayor LSI tienen un peso mayor para creación del mapa realizado mediante la herramienta de

superposición ponderada. Posteriormente se clasifica el mapa en 7 categorías de susceptibilidad.

2.4 Niveles de susceptibilidad

Para conocer los niveles de susceptibilidad es importante clasificar los diferentes rangos de manera adecuada. Para lograrlo se utilizó una clasificación realizada por Santacana [7], que consiste en distribuir 7 niveles diferentes de susceptibilidad como se muestra en la tabla 1.

Tabla 1. Niveles de susceptibilidad

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

Fuente: (Santacana 2003).

3. Resultados y discusión

Con los resultados obtenidos del índice de susceptibilidad (LSI), se determinaron los parámetros o factores más influyentes a desencadenar un deslizamiento en el corregimiento de Cerro Punta.

De acuerdo con los resultados del LSI obtenidos en el análisis (ver tabla 2), el parámetro más influyente es la proximidad a calles, seguido a proximidad a fallas geológicas, proximidad a ríos, cobertura boscosa y uso de suelos y precipitación. Entre las menos influyentes están orientación y pendientes, elevaciones y curvatura.

Tabla 2. Valores de LSI máximos por parámetro

Parámetros	Unidad	LSI
Proximidad a calles	metros	7.6
Proximidad a fallas geológicas	metros	6.76
Proximidad a ríos	metros	6.01
Cobertura boscosa y uso de suelos	tipo	5.53
Pendientes	grados	5.41
Precipitación media anual	milímetros	5.22
Orientación de pendientes	grados	5.02
Elevaciones	4.89	4.89
Curvatura	tipo	2

Los valores mostrados en la tabla 2 son los máximos valores de LSI de cada parámetro. Los valores de LSI para cada rango de parámetro están indicados en la tabla 3. Los valores máximos de LSI fueron usados para realizar el mapa de susceptibilidad con la herramienta de superposición ponderada del programa ArcGIS PRO.

La herramienta requiere de pesos para ponderar cada parámetro, los cuales determina el grado de influencia que tiene cada factor dentro del mapa de susceptibilidad. En los mapas cualitativos, estos pesos suelen ser definidos a través de la experiencia de un profesional en susceptibilidad a deslizamientos. En el caso de estudio por ser un método cuantitativo, se otorgaron los pesos en concordancia de los índices de susceptibilidad que indican que el parámetro más influyente es la proximidad a calles, por lo cual es el factor con mayor peso en el mapa. En la figura 12 se muestran los pesos otorgados a cada parámetro en porcentaje.

El resultado de la herramienta de superposición ponderada es el mapa de susceptibilidad que indica las zonas más propensas a desarrollarse un deslizamiento de tierra. El mapa fue clasificado en 7 niveles de susceptibilidad descritas en la sección 2.4, pero en el área de Cerro Punta sólo se presentaron 5 clases de susceptibilidad de la categorización de Santacana, que pueden observarse en el mapa de susceptibilidad anexado en la figura 13.

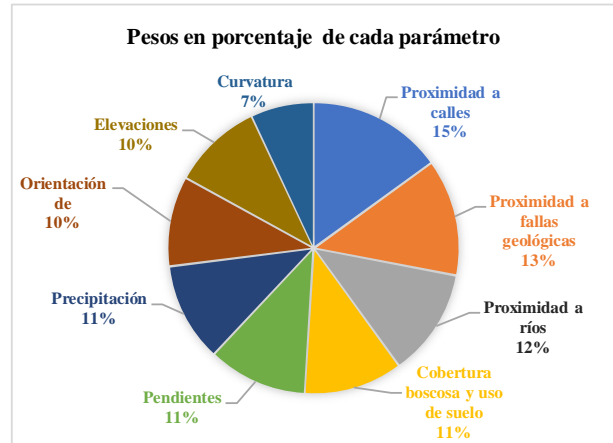


Figura 12. Pesos en porcentaje otorgados a cada parámetro.

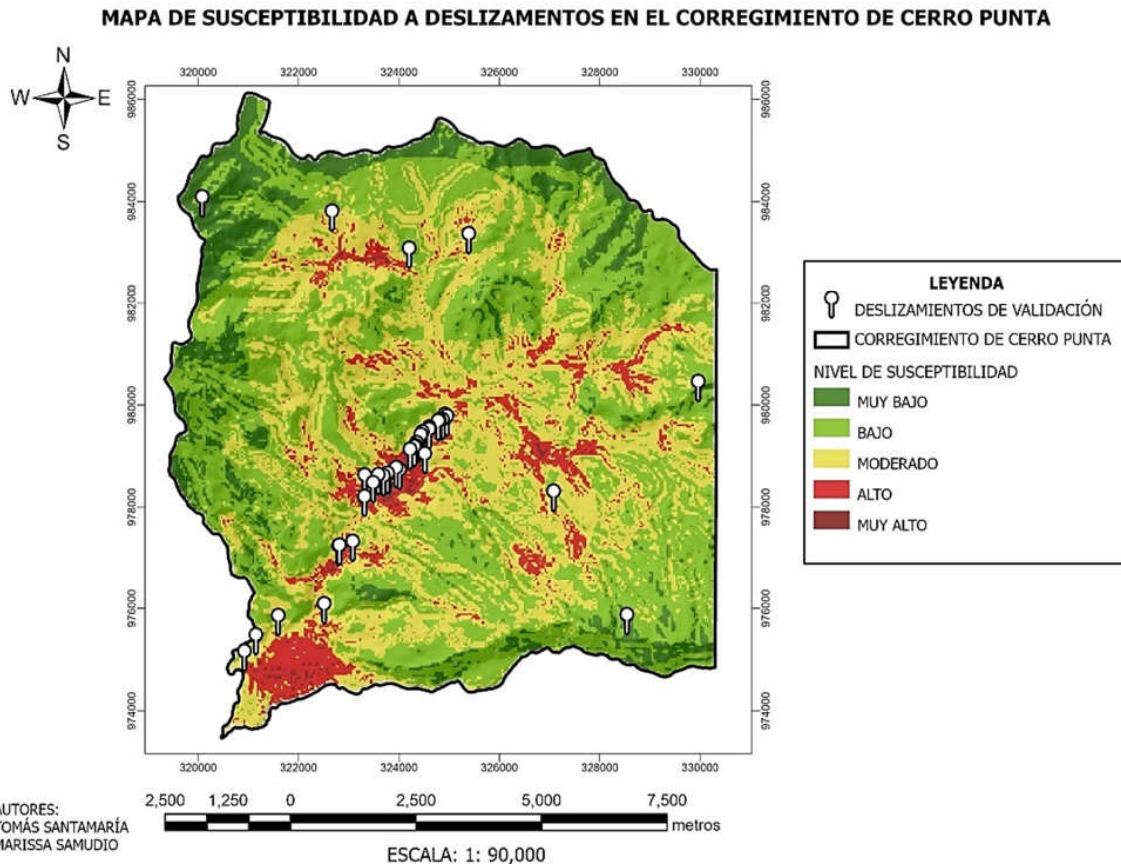


Figura 13. Mapa de susceptibilidad a deslizamientos en el corregimiento de Cerro Punta.

Tabla 3. Tabla de valores de LSI para cada parámetro

Parámetros	ID clase	Rango de clase	Deslizamientos	Deslizamientos (%)	Píxeles totales de la clase	Píxeles totales de la clase	Frecuencias LSI
Precipitación media anual (mm)	1	2106 - 2186	4	0.1333	6570	0.1210	1.102
	2	2186 - 2250	13	0.4333	12904	0.2376	1.824
	3	2250 - 2331	3	0.1000	16823	0.3097	0.323
	4	2331 - 2431	7	0.2333	9661	0.1779	1.312
	5	2431 - 2558	3	0.1000	8248	0.1518	0.659
Proximidad a ríos(m)	1	> 200	6	0.2000	22968	0.4228	0.473
	2	200 - 150	4	0.1333	6203	0.1142	1.168
	3	150 - 100	5	0.1667	5148	0.0948	1.759
	4	100 - 50	4	0.1333	8899	0.1638	0.814
	5	50 - 0	11	0.3667	11100	0.2044	1.794
Cobertura boscosa y uso de suelos	1	Bosques	18	0.6000	30533	0.5621	1.067
	2	Vegetación arbustiva y herbácea	1	0.0333	3004	0.0553	0.603
	3	Áreas abiertas sin o con poca vegetación	0	0.0000	341	0.0063	0.000
	4	Agropecuario	9	0.3000	18429	0.3393	0.884
	5	Superficie de agua	0	0.0000	285	0.0052	0.000
	6	Áreas culturales	3	0.1000	1826	0.0336	2.975
Elevaciones (m)	1	1478 - 1843	14	0.4667	7175	0.1321	3.533
	2	1843 - 2208	10	0.3333	24025	0.4423	0.754
	3	2208 - 2573	6	0.2000	18000	0.3314	0.604
	4	2573 - 2938	0	0.0000	4361	0.0803	0.000
	5	2938 - 3303	0	0.0000	757	0.0139	0.000
Pendientes (°)	1	0 - 8.5	5	0.1667	9870	0.1817	0.917
	2	8.5 - 16.7	9	0.3000	14387	0.2649	1.133
	3	16.7 - 26.6	12	0.4000	15419	0.2839	1.409
	4	26.6 - 45	3	0.1000	13474	0.2481	0.403
	5	> 45	1	0.0333	1168	0.0215	1.550
Orientación de pendientes	1	Plano	0	0.0000	0	0.0000	0.000
	2	Norte	2	0.0667	4934	0.0908	0.734
	3	Este	3	0.1000	10388	0.1912	0.523
	4	Sur	7	0.2333	16853	0.3103	0.752
	5	Oeste	12	0.4000	15351	0.2826	1.415
	6	Norte	6	0.2000	6792	0.1250	1.599
Proximidad a fallas geológicas (m)	1	> 1200	9	0.3000	29114	0.5360	0.560
	2	1200 - 900	7	0.2333	5469	0.1007	2.317
	3	900 - 600	5	0.1667	6190	0.1140	1.463
	4	600 - 300	4	0.1333	6980	0.1285	1.038
	5	300 - 0	5	0.1667	6565	0.1209	1.379
Curvatura	1	Convexa	17	0.5667	29012	0.5341	1.061
	2	0	0	0.0000	0	0.0000	0.000
	3	Cóncava	13	0.4333	25306	0.4659	0.930
Proximidad a calles (m)	1	> 100	11	0.3667	36978	0.6808	0.539
	2	100 - 75	4	0.1333	4821	0.0888	1.502
	3	75 - 50	1	0.0333	2381	0.0438	0.760
	4	50 - 25	10	0.3333	6220	0.1145	2.911
	5	25 - 0	4	0.1333	3918	0.0721	1.848

3.1 Validación del método

Para validar el resultado se utilizaron los 38 deslizamientos restantes planteados en el punto 2.2.1. Cabe resaltar que, de estos 38 deslizamientos, 23 ocurrieron durante el paso del huracán Eta que afectó significativamente el corregimiento de Cerro Punta, destruyendo carreteras, viviendas y causando pérdida de vidas humanas.

La tabla 4 muestra la cantidad de deslizamientos que caen dentro de cada una de las diferentes categorías de susceptibilidad planteadas en el punto 2.4, logrando un porcentaje de 89.4% de aceptación del mapa.

Tabla 4. Porcentaje por cada nivel de susceptibilidad

Nivel de susceptibilidad	No. de deslizamientos	Porcentaje %
Extremadamente baja	0	0.0
Muy baja	2	5.3
Baja	2	5.3
Moderada	10	26.3
Alta	23	60.5
Muy alta	1	2.6
Extremadamente alta	0	0.0
Σ	38	100.0

4. Conclusiones

Este artículo resume los resultados obtenidos en la determinación de áreas susceptibles a deslizamientos de tierra en el corregimiento de Cerro Punta, una zona cuyo rápido desarrollo de las actividades agrícolas evidencia la necesidad e importancia de contar con mapas que delimiten áreas de terrenos con predisposición a deslizarse. Esta información ayuda a evitar o minimizar el impacto de catástrofes como lo sucedido durante el paso del huracán ETA en noviembre del 2020.

La delimitación de áreas susceptibles en Cerro Punta fue desarrollada utilizando el método cuantitativo del índice de susceptibilidad a deslizamientos (LSI), el cual utiliza como datos de entrada un inventario histórico de deslizamientos e información de los factores condicionantes y desencadenantes que provocan estos eventos. Los resultados obtenidos en el estudio indican que los factores de proximidad a calles, proximidad a ríos y fallas geológicas son los parámetros más condicionantes a la ocurrencia de deslizamientos en la zona objeto de estudio.

El mapa fue desarrollado utilizando un total de 30 deslizamientos históricos ocurridos en el área, logrando así determinar 5 categorías de susceptibilidades. Esta información fue validada usando datos de 38 deslizamientos adicionales, de los cuales 23 de éstos fueron reportados durante el paso del huracán ETA. Los resultados de la validación indican que el mapa fue capaz de identificar la susceptibilidad de las zonas en un 89.4 %, cuya categorización de susceptibilidad a deslizamiento es de moderada a muy alta.

Los resultados obtenidos aportan información relevante para la toma de decisiones en materia de gestión de riesgos, planeamiento urbano y agrícola, uso de suelos, entre otros. Sin embargo, investigaciones adicionales son necesarios para confeccionar mapas de riesgos a deslizamientos, los cuales definen la vulnerabilidad de lugares poblados y de producción agrícola, así como la probabilidad de ocurrencia de deslizamientos en estas zonas.

5. RECOMENDACIONES

- Realizar una investigación a detalle de los principales factores que controlan y desencadenan procesos que puedan tener afectaciones en Cerro Punta, con el fin de evitar posibles deslizamientos de tierra.
- Implementación de sistemas de monitorio en las laderas que presenten mayor riesgo geológico y susceptibilidad a deslizamientos de tierra.
- La ocurrencia de los últimos deslizamientos de tierra evidencia la necesidad de que las autoridades, entidades gubernamentales y la población en general establezcan políticas encaminadas a la prevención y control de riesgos asociados a la ocurrencia de deslizamientos.

AGRADECIMIENTO

Agradecemos a la Lic. Damaris Sánchez y al Lic. David Samudio de la Fundación para el Desarrollo Integral, Comunitario y Conservación de los Ecosistemas en Panamá (FUNDICCEP) por proporcionar información sobre el área de estudio; al Lcdo. Luis Villamontes, Geógrafo de SINAPROC por su colaboración en aportar información relevante sobre datos de deslizamientos utilizada para el desarrollo de esta investigación.

REFERENCIAS

- [1] I. F. Chaverrí Molina. "Zonificación de la susceptibilidad a deslizamiento, por medio de la metodología Mora-Vahrson, en la microcuenca del Río Macho, San José, Costa Rica." Trabajo de Grado, Escuela Ing. Forestal, Inst. Tec. Costa Rica, Cartago de Costa Rica, 2016. Disponible en <https://core.ac.uk/download/pdf/83116015.pdf>
- [2] L. Rivera. "El uso de los sistemas de información geográfica en la zonificación de amenazas por desastres naturales". Univ. Tec. de Panamá, Ciudad de Panamá, Panamá, Nov 2013. [Internet]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/258422312_Articulo_sobre_SIG_y_deslizamientos_en_Panama
- [3] Autoridad Nacional de Ambiente. (2006). Indicadores Ambientales. En I. d. Panamá.
- [4] O. Lindsay, y N. Weinberg. "Desastres Naturales en Cerro Punta: Historia e Impactos,.". Proyecto de Investigación, Instituto Smithsonian. Provincia de Chiriquí, Panamá, 2019 [Internet]. Disponible en: https://www.mcgill.ca/pfss/files/pfss/desastres_naturales_en_cerro_punta_-_historia_e_impactos.pdf

- [5] Climate-Data.org (s. f.). “Cerro Punta Clima”. [Internet]. Disponible en <https://es.climate-data.org/america-del-norte/panama/provincia-de-chiriqui/cerro-punta-765424/>
- [6] Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales El Salvador. *Memoria Técnica para el Mapa de Susceptibilidad de Deslizamiento de Tierra en El Salvador*. San Salvador: Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales El Salvador. 2004. Disponible en: <https://app.ingemmet.gob.pe/biblioteca/pdf/Amb-21.pdf>
- [7] J. Navarro Vidal. “Susceptibilidad y amenaza de movimientos de ladera mediante S.I.G. en el municipio de Berlín, El Salvador” Tesis de Maestría, Tec. Inf. Geográfica., Univ. Complutense de Madrid, Madrid, España, 2012. Disponible en http://eprints.ucm.es/id/eprint/19876/1/TFMJNV_FINALCUT.pdf
- [8] M. Mendoza, y L. Domínguez. (s. f.). Estimación del peligro y el riesgo de deslizamientos en laderas. [Internet] Disponible en: http://www1.cenapred.unam.mx/DIR_SERVICIOS_TECNICOS/SANI/PAT/2017/4o%20trimestre/2362%20DI/10728/DS/octubre/UNIVERSUM-IGEOF/CAPITULO_V.pdf
- [9] N. Santacana, B. Baeza, J. Corominas, A. De Paz, y J. Maturía. (2002). “A GIS-Based Multivariate Statistical Analysis for Shallow Landslide Susceptibility Mapping in La Pobra de Lillet Area (Eastern Pyrenees, Spain)”. *Natural Hazards*, no. 30, pp. 281-295, 2003. [En línea]. Disponible en https://www.researchgate.net/publication/225848202_A_GIS-Based_Multivariate_Statistical_Analysis_for_Shallow_Landslide_Susceptibility_Mapping_in_La_Pobla_de_Lillet_Area_Eastern_Pyrenees_Spain/link/0fcfd50d1d8f9a04a3000000/download
- [10] A. C. Flórez García, y J. N. Pérez Castillo. “Técnicas para la predicción espacial de zonas susceptibles a deslizamientos”. *Avance: Investigación e Ingeniería*, vol 16, no. 1, 2019. doi:10.18041/1794-4953/avances.1.5188
- [11] A. L. Abril Abril. “Estudio e implementación de un modelo para la zonificación de áreas susceptibles a deslizamiento mediante el uso de sistemas de información geográfica: caso de estudio sector Quimsacocha” Tesis de Pregrado., Fac. de Ingeniería, Univ. de Cuenca. Cuenca, Ecuador, 2011. Disponible en <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/739>
- [12] A. Díaz, D. Acosta y D. Sáez, “Mapa de susceptibilidad a deslizamientos en el distrito de San Miguelito”, *I+D Tecnológico*, vol. XV, nº 1, pp. 59-70, 2019. Accedido: Oct 25, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://revistas.utp.ac.pa/index.php/idtecnologico/article/view/2100/3048>
- [13] Oficina de Asistencia para Desastres en el Extranjero; Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional., *Manual Sobre el Manejo de Peligros Naturales en la Planificación para el Desarrollo Regional Integrado*, Washington, D.C., 1993.
- [14] A. Rodríguez Díaz, y D. Acosta Reyes. “Mapa de susceptibilidad a deslizamientos en el distrito de San Miguelito, Panamá, incorporando herramientas de SIG” Tesis de Grado., Fac. de Ing. Civil, Univ. Tec. de Panamá., Ciudad de Panamá, Panamá, 2018.
- [15] C. A. Gálvez Hooper. “Evaluación del riesgo a inundaciones y deslizamientos en la parte alta de la cuenca del río Chiriquí Viejo, Panamá”. Tesis de Posgrado, Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza., Turrialba, Costa Rica, 2010. Disponible en <http://repositorio.bibliotecaorton.catie.ac.cr/handle/11554/5072>