

Geostatistical modeling of susceptibility to landslides in the district of Cajamarca

Wilder Chuquiruna, Dr¹ , Eliana Castrejón, Mg² 

¹Universidad Privada del Norte (UPN), Perú, wilder.chuquiruna@upn.pe

²Universidad Privada del Norte (UPN), Perú, eliana.castrejon@upn.pe

Abstract: *The geostatistical modelling of landslide susceptibility aimed to analyze the initiation of landslides and the areas potentially affected by their propagation. Landslide susceptibility depends on intrinsic factors, which were modelled using the historical landslide inventory from the southern sector of the Cajamarca district. The stochastic methodology applied allowed the generation of a landslide susceptibility zoning map through the combination of the following variables: slope, geology, geological faults, and road cuts, factors considered essential for this study. The results were computed using Excel and ArcGIS 10.5, yielding the weighting of each factor through the geostatistical kriging technique. The corresponding weights obtained were 0.05, 0.08, 0.24, and 0.13 for distance to road, distance to geological fault, slope, and geology, respectively. These results were then used to estimate the susceptibility values. Subsequently, variograms were developed and calculated in the 0°, 45°, 90°, 135°, and 70° directions, applying theoretical variogram models, nugget effect, spherical, exponential, and Gaussian to determine the anisotropy. The study concludes with the development of the landslide susceptibility map using ordinary kriging, establishing that slope and geology are the most influential intrinsic factors. Moreover, the study area exhibits a structural behavior oriented at 70° and best fits the spherical variogram model.*

Keywords: *Susceptibility, landslides, geostatistics, variograms and kriging.*

Modelación geoestadística de susceptibilidad a deslizamientos en el distrito de Cajamarca

Wilder Chuquiruna, Dr¹, Eliana Castrejón, Mg²

¹Universidad Privada del Norte (UPN), Perú, wilder.chuquiruna@upn.edu.pe

²Universidad Privada del Norte (UPN), Perú, eliana.castrejon@upn.edu.pe

Resumen: La modelación geoestadística de susceptibilidad a deslizamientos, tuvo como objetivo analizar el inicio de deslizamientos y zonas que pueden ser afectados por la propagación de deslizamientos. La susceptibilidad a deslizamientos depende de los factores intrínsecos, los cuales se modeló utilizando el inventario histórico de la zona sur en el distrito de Cajamarca. La metodología estocástica con la cual se obtuvo la zonificación a susceptibilidad del terreno a la generación de deslizamientos por combinación de las variables pendiente, geología, fallas geológicas y cortes de carretera factores considerados para esta investigación. Los resultados se calcularon utilizando el software Excel y ArcGIS 10.5 obteniendo como resultado el cálculo de los pesos de cada factor, ello se realizó utilizando la técnica geoestadística de Kriging, del cual se obtuvo pesos de 0.05, 0.08, 0.24 y 0.13 respecto a la distancia a la carretera, distancia a falla geológica, pendiente y geología respectivamente; con estos resultados se procedió a calcular los valores estimados a susceptibilidad de deslizamiento, luego se procedió a desarrollar y calcular los variogramas en direcciones de 0°, 45°, 90°, 135° y 70° con cada modelo variográfico teórico como el efecto pepita, esférico, exponencial y gaussiano para determinar la anisotropía. Concluyendo en la elaboración del mapa de susceptibilidad utilizando el kriging ordinario, para el cual se determinó que los factores intrínsecos más incidentes a la susceptibilidad a deslizamientos son la pendiente y la geología, además la zona de investigación tiene un comportamiento estructural en la dirección de 70° y se ajusta al modelo variográfico esférico.

Palabras clave: Susceptibilidad, deslizamientos, geoestadística, variogramas y kriging

I. INTRODUCCIÓN

Los deslizamientos de tierra naturales son un grave peligro para los seres humanos. A nivel mundial los deslizamientos causan miles de muertes cada año y representan un componente importante de las pérdidas humanas por desastres naturales. En el estado peruano, INDECI indica que entre los años 2003 y 2025 se identificó a nivel nacional más de 3600 eventos entre deslizamientos y derrumbes. A nivel local, definido como distrito de Cajamarca, el Instituto Geológico Minero Metalúrgico (INGEMMET) identificó 171 zonas críticas por causa de peligros geológicos, los cuales están relacionados con la susceptibilidad a deslizamientos y son afectados por factores intrínsecos como: geomorfológicos, estructuras geológicas, geomecánicas, topográficos y factores extrínsecos determinados como: precipitación y sismología [1].

Los eventos de susceptibilidad a deslizamientos se correlacionan entre variables intrínsecas y extrínsecas; la predicción de ellos es importante para hacer el análisis de zonas críticas, utilizando la modelación geoestadística, sensoramiento remoto y sistema de información geográfica,

logrando la modelación geoestadística aplicado a la susceptibilidad de deslizamientos.

La importancia de realizar un trabajo de investigación en susceptibilidad de deslizamientos aplicando geoestadística es para identificar las zonas críticas propensas a deslizamientos con sus niveles de probabilidad de ocurrencia y elaborar planos de zonificación a susceptibilidad de deslizamientos. Por ello nos preguntamos, ¿Cómo la modelación geoestadística de susceptibilidad a deslizamientos contribuirá con la zonificación de áreas que muestran actividad de deslizamientos en el distrito de Cajamarca?

En la investigación se hizo la modelación Geoestadística para la zonificación de susceptibilidad de deslizamientos, ya que la geoestadística es una técnica insesgada y con menor error en la predicción respecto a los métodos determinísticos, probabilísticos y geomorfológicos [2]. La metodología aplicada para esta investigación es la metodología estocástica, esta interpola los parámetros que influyen en la susceptibilidad a deslizamientos para construir planos de elevación, pendiente, curvatura y orientación del terreno, proximidad a carreteras y ríos, a partir de estos generar planos de zonificación de susceptibilidad [3].

La susceptibilidad a deslizamientos, se define como qué tan propenso es un terreno al deslizamiento, independiente de los daños que cause a los elementos de riesgo, como bienes materiales y personas [4], para ello el Índice de Susceptibilidad a deslizamientos (IS) está conformado por la acumulación de la aportación individual de cada uno de los factores considerados [5]; la susceptibilidad a deslizamiento considera como parámetros a la litología, la humedad del suelo, la sismicidad (intensidad sísmica Mercalli) y la precipitación (intensidad de lluvias), las cuales pueden ser trabajadas en un Sistema de Información Geográfica (SIG) [6].

La investigación se desarrolló en el distrito de Cajamarca, entre los años 2019 al 2022. Para la zonificación espacial de susceptibilidad a deslizamientos, se utilizó la técnica de geoestadística considerando las variables de las unidades morfogénicas, geológicas y geodinámicas. La delimitación espacial de las áreas con potencial susceptibilidad a deslizamiento, utilizo indicadores morfo-dinámicos tales como el factor pendiente, que en este caso sustituirá al factor de relieve relativo utilizado en la metodología original [7].

En esta investigación se plantea usar el método estocástico en el cual se incluye a la geoestadística por ser un

método que se ubica en el tiempo y espacio, con este método se estimó la susceptibilidad a deslizamientos.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

La presente investigación se basó principalmente en dos etapas, las cuales se detallan a continuación.

A. Etapa de recolección de información

Esta etapa se centró en inventariar los deslizamientos que ocurrieron en el pasado, los cuales se encuentra Geocatmin 2021 del instituto geológico minero metalúrgico (INGEMET) [8][9], además se agregó los deslizamientos del cartografiado a partir de imágenes satelitales del servidor SAS Planet.

1. Codificación de los datos categóricos de peligros geológicos, considerando el valor más alto al tipo de peligro que es más numeroso.
2. Codificación de la litología agrupándolo por formación geológica las cuales fueron agrupados por la génesis de tipo de roca, dándole valor más alto a lo que más área ocupa la zona de investigación.
3. Se clasifica las unidades morfogénicas en base a intervalos de pendiente el cual se agrupa en base a lo que más se encuentra en la zona de trabajo.
4. Los intervalos de las distancias de las carreteras se agrupan para asignarles valores enteros.
5. Los intervalos de las distancias de las fallas se agrupan para asignarles valores enteros.

B. Etapa de procesamiento del análisis geoestadístico

En esta etapa se realizó el análisis con cada uno de los factores, utilizando softwares de cálculo y modelamiento geoestadístico:

1. Se realizó la estadística descriptiva,
2. Se estandariza las variables consideradas para la investigación,
3. Cálculo de correlación entre las variables y covarianza,
4. Cálculo de los pesos de cada variable,
5. Cálculo de valores estimados de susceptibilidad,
6. Cálculo de los variogramas experimentales en las direcciones al menos a 0°, 45°, 90°, 135 Y 70°,
7. Ajuste por cada dirección de variogramas experimentales a los variogramas teóricos como efecto pepita, esférico, gaussiano y exponencial,
8. Determinar el comportamiento estructural y anisotrópico interpretado del análisis de los variogramas experimentales y ajustado a los variogramas teóricos,
9. A partir de los valores estimados de las zonas susceptibles a deslizarse se modela las zonas de susceptibilidad, utilizando el modelado de 3D análisis del software ArcGIS.

Procesamiento de datos

Para el procesamiento y análisis de datos se siguió el proceso detallado en la fig. 1:

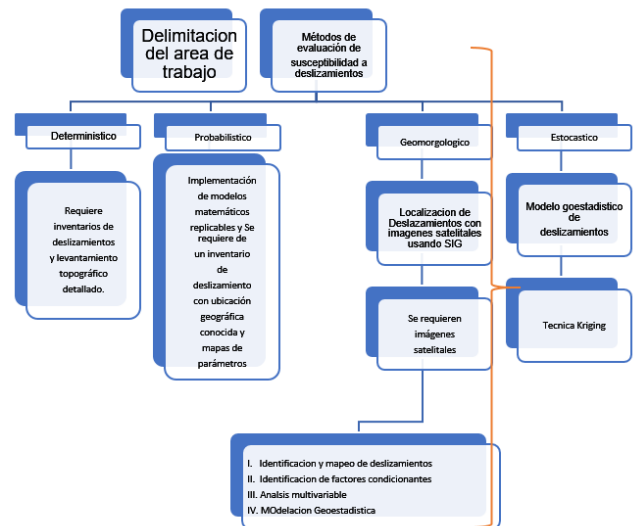


Fig. 1. Proceso de trabajo

Análisis de Susceptibilidad de Deslizamientos

Los riesgos de deslizamientos se clasifican en susceptibilidad por elementos pasivos: pendiente, litología, humedad del suelo y susceptibilidad por elementos activos: intensidad sísmica e intensidad de lluvias [10].

Combinando estas 2 variables se obtiene un nivel de amenaza relativa, aclarando que cada parámetro se debe considerar un peso ponderado. Entonces el nivel relativo de amenaza (H), a través de la multiplicación y sumas de los índices por medio de las siguientes ecuaciones [11]

$$H = (Sr * SI * Sh) * (Ts + Tp).$$

En donde:

Pendiente (Sr): representa la topografía del área en estudio.

Litología (SI): este factor representa la influencia de los tipos de materiales, sedimentos y rocas en la activación de los deslizamientos.

Humedad del suelo (Sh): cuantifica la influencia de la humedad acumulada

Intensidad sísmica (Ts): este factor se determina mediante el análisis de los deslizamientos de tierra provocados por terremotos para establecer la influencia de intensidades sísmicas durante todo el año.

Intensidad de lluvias (Tp): este factor calcula la influencia de la lluvia en el tiempo [4]

Método Geoestadístico de Kriging

La susceptibilidad a deslizamientos es un fenómeno de la ciencia de la tierra el cual tienen ubicación en el tiempo y/o espacio por lo cual es una variable regionalizada (VR), esta tiene sus coordenadas este, norte, cota y variable en análisis en un punto específico, siendo la VR base para la conformación de los variogramas experimentales el cual es desarrollado por la geoestadística.

La Geoestadística al inicio fue vista como un medio para describir los patrones espaciales e interpolar los valores de un atributo de interés en sitios no muestreados. Actualmente se usa para modelar incertidumbre sobre valores desconocidos a través de la generación de imágenes alternativas (realizaciones), las cuales reproducen aspectos de los patrones de dependencia espacial, las estimaciones se mejoran si se considera las muestras vecinas, es decir, descubrió que existía una autocorrelación. Al mismo tiempo que Krige trabajó empíricamente con la autocorrelación, (desarrollado por Daniel Gerhardus Krige (1919-2013)) [12]

Matheron (1930 - 2000), matemático y geólogo francés, quien también buscó la forma de estimar con mayor precisión las concentraciones de metales a partir de muestras de datos auto correlacionados. El éxito de la Geoestadística radica en que varias disciplinas tienen el mismo problema. Se cuenta con un entorno continuo, pero, debido al costo o a la dificultad para hacer muestreos, sólo se tienen mediciones en un número finito de lugares [13].

La identificación de los deslizamientos históricos es la herramienta básica para la evaluación de la susceptibilidad a través de métodos geoestadísticos. Este es la principal fuente de información con fines de calibración y validación de los resultados de los mapas de zonificación de la susceptibilidad [14].

Actualmente los métodos para el análisis de susceptibilidad están divididos en cualitativo y cuantitativo. Para el primer caso se encuentran el análisis geomorfológico y heurístico, los cuales son modelos que dependen del conocimiento del experto, para el segundo caso destacan los métodos determinísticos y modelos estadísticos, que buscan estandarizar los criterios de análisis y disminuir la profesional intervención en la elaboración del modelo [15].

En el trabajo de investigación se utilizó las técnicas estocásticas a la cual pertenece la geoestadística, ya que analiza y estima las variables ubicándose en el espacio o en el tiempo de una forma estructurada [16].

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. Ubicación

La zona de investigación se ubica geográficamente en el departamento de Cajamarca, situado en la sierra norte del país. El área a estudiar está en parte sur del distrito de Cajamarca.

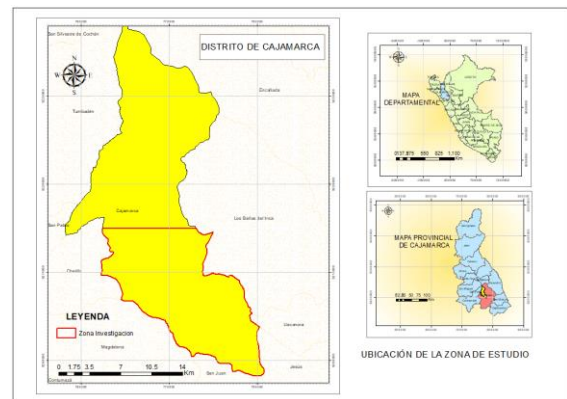


Fig.2 Ubicación de la zona de investigación. (V1 N9215000 W762200, V2 N9215000 W780800, V3 N919800 W780800, V4 N9198000 W7622000)

B. Geología local

El área de estudio presenta una geología heterogénea, compuesta principalmente por formaciones sedimentarias no clásticas (Santa, Yumagual, Chulec, Pariatambo, Quilquiñan–Mujarrun y Cajamarca), las cuales ocupan la mayor extensión del área y fueron codificadas con el valor ráster más alto (4) debido a su alta incidencia espacial y su influencia en la susceptibilidad a deslizamientos.

Las formaciones sedimentarias clásticas (Carhuaz, Farrat y Chimú), constituidas por areniscas y lutitas, presentan una incidencia intermedia y fueron asignadas con un valor ráster de 3. Las unidades volcánicas (Huambos y San Pablo), representadas por rocas ígneas extrusivas, fueron codificadas con un valor ráster de 2, mientras que los depósitos cuaternarios (fluviales, aluviales y lacustres) corresponden a materiales no consolidados y fueron clasificados con el menor valor ráster (1).

La distribución litológica del área constituye un factor condicionante clave en la modelación geoestadística de la susceptibilidad a deslizamientos.

En la figura 3 se aprecia la geología presente en el área de investigación la cual se convirtió en una imagen ráster teniendo en cuenta que los valores asignados son considerando el área de incidencia, por tipo de litología y área de incidencia.

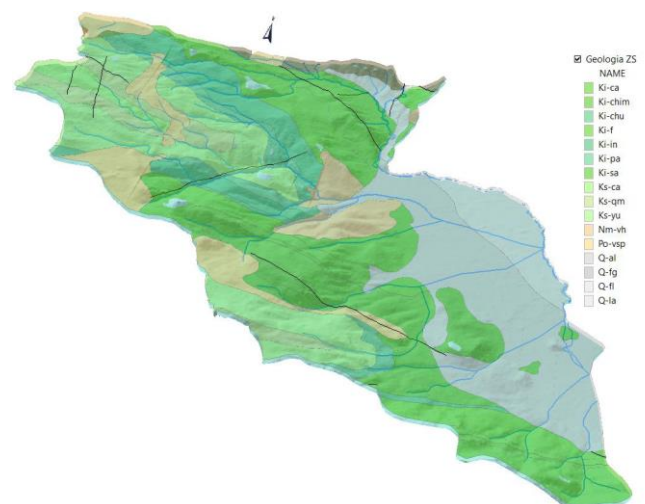


Fig.3 Geología local del área de investigación

C. Variables categóricas

Las variables categóricas que se consideraron para el análisis de susceptibilidad a deslizamientos. Fue clasificado con los siguientes códigos como deslizamiento=1, mov. complejo=2, reptación=3, caída=4, flujo=5, la litología se clasifico agrupando las formaciones geológicas a tipo de roca, Formación Santa, Formación Yumagual, Formación Chulec, Formación Pariatambo, Formación Quilquiñan/Mujarrun, Formación Cajamarca agrupado como no clásticas = 4; Formación Carhuaz, Formación Farrat, Formación Inca, Formación Chimú agrupado como clástica = 3; Volcánico Huambos, Volcánico San Pablo agrupado como volcánico =2 y Depósitos Fluviales, Depósitos Aluviales, Depósitos Lacustres, agrupado depósitos cuaternarios = 1

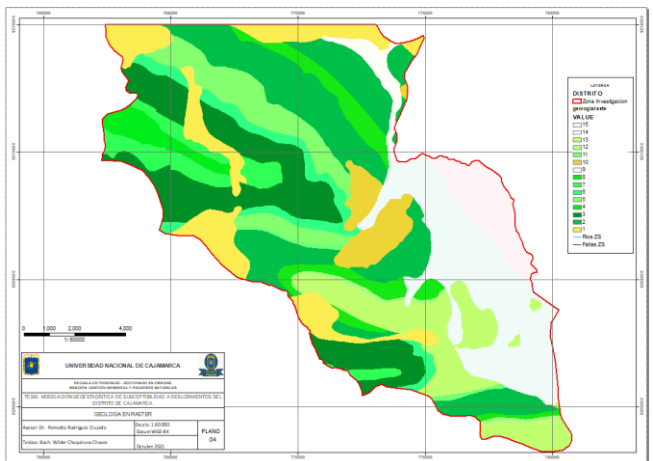


Fig. 4 Geología de la zona de estudio

Se presenta la geología del área de investigación la cual se convirtió en una imagen ráster según la codificación, teniendo en cuenta que los valores asignados son considerando el área de incidencia, por tipo de litología y área de incidencia.

D. Variables numéricas

Las variables numéricas se clasifican en discretas que son números enteros y continuos que son números decimales. Para la investigación de Pendientes por unidades morfogenéticas se codifico de la siguiente manera planicies entre 0°-8° = 2, Lomadas entre 8°-20° = 3, Laderas entre 20°-50° = 4, Escarpes entre >50° = 1, además cabe recalcar que la codificación de las pendientes se realizó dando valores de acuerdo donde se ha encontrado mayor cantidad de deslizamientos.

La Distancia de deslizamientos a carretera se codificó considerando la distancia que se encuentra el número de deslizamientos, es decir para los deslizamientos más distantes se codificó con el valor más alto. Distancia entre 0-20 = 1, Distancia entre 20-40 = 2, Distancia entre 40-60 = 3, Distancia entre 60-80 = 4, Distancia entre 80-100 = 5, Distancia entre >100 = 0.

La Distancia de deslizamientos a fallas geológicas se codifico considerando la distancia que se encuentra el número de deslizamientos, es decir para los deslizamientos más distantes se codifico con el valor. Distancia Falla entre 0-20 = 1, Distancia Falla entre 20-40 = 2, Distancia Falla entre 40-

60 = 3, Distancia Falla entre 60-80 = 4, Distancia Falla entre 80-100 = 5, Distancia Falla entre >100 = 0

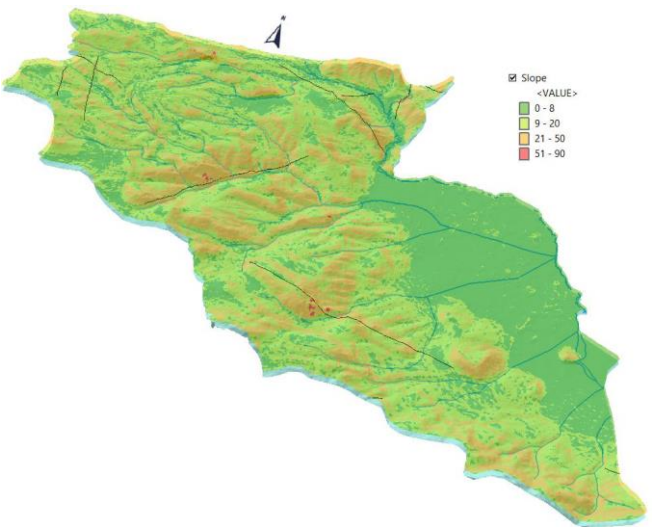


Fig. 5 Plano de pendientes

E. Análisis Multivariable de los Factores Condicionantes en la Ocurrencia de Deslizamientos

El primer paso para el análisis multivariable, es realizar la estandarización de datos (transformación Z), los cuales están detallados en la tabla 1, para ello se dispuso las variables peligro geológico, distancia a carretera, distancia a fallas, pendiente y geología en columnas, las cuales son X1, X2, X3, X4 y X5 respectivamente.

Tabla. 1 Datos de peligros geológicos

ID	Este	Norte	Deslizamiento	Cód. Des.	Cód. Dist. Carretera	Cód. Dist. Fallas	Pen.	Geo.
1	766953	9214964	Deslizamiento	5	6	0	9	3
2	771928	9214772	Deslizamiento	5	6	0	27	2
3	771377	9214746	Deslizamiento	5	6	0	10	2
249	779292	9198596	Deslizamiento	5	1	0	36	3
250	780178	9198505	Deslizamiento	5	6	0	31	3
251	779658	9198462	Deslizamiento	5	6	0	24	3

La Tabla 1 muestra los tipos de peligros y los factores intrínsecos considerados para el cálculo de estimación, además se debe tener en cuenta que a partir de la tabla 1 la línea ploma que parece dentro de la tabla es indicador de la función inmovilización de paneles del Software Excel, este ayuda a ver los encabezados y los datos iniciales y finales con el fin de mostrar la cantidad de datos que se utilizaron en la presente investigación

F. Correlación de variables

Para analizar la asociación o correlación entre dos o más variables se usa el coeficiente de correlación Pearson y por lo general se describe el comportamiento de una de las variables, que se llama la variable dependiente (Y), y en función de la variable (X), que se llama la variable independiente o

explicativa. El Segundo paso para el análisis multivariable, es realizar la estandarización de datos (transformación Z) y el tercer paso se calcula la correlación multivariable, en donde se observa el grado de asociación entre las variables. En la tabla 2 se muestra la correlación moderada entre la pendiente y los deslizamientos.

Tabla. 2 Coeficiente correlación de variables

	ST. Des.	ST. Dist. Carretera	ST Dist. Falla	ST Pen.	ST Geo.
Cód. Deslizamiento	1	0.1	0.1	0.3	0.1
Cód. Dist. Carretera		1	-0.1	0.1	0.2
Cód. Dist. Fallas			1	0.1	-0.1
Pendiente				1	0.0
Geología					1

G. Cálculo de peso de cada variable

Para el cálculo de los pesos de cada variable se utilizó la técnica geoestadística de kriging este es un método espacial, el cual calcula los pesos de cada variable a partir de la conformación de la matriz de correlaciones y con ello estima los valores de cada variable en análisis. El kriging es un estimador insesgado con una varianza mínima. Con el producto de los pesos de cada variable W_1 , W_2 , W_3 y W_4 , que se muestran en la tabla 3, estos se multiplican con cada valor estandarizado de cada variable, distancia a la carretera (X_1), distancia a la falla (X_2), pendiente (X_3) y geología (X_4), que se muestran en la tabla 3; se obtendrá el valor el estimado estandarizado V_z . $V_z = X_1 W_1 + X_2 W_2 + X_3 W_3 + X_4 W_4$

Tabla. 3 Conformación de matriz

Matriz A						Matriz B	
	ST. Dist. Carretera	ST Dist. Falla	ST Pendiente	ST Geología			ST Deslizamiento
Cód. Dist. Carretera	1.0	-0.1	0.1	0.2		Cód. Dist. Carretera	0.10
Cód. Dist. Fallas	-0.1	1.0	0.1	-0.1		Cód. Dist. Fallas	0.08
Pendiente	0.1	0.1	1.0	0.0		Pendiente	0.25
Geología	0.2	-0.1	0.0	1.0		Geología	0.14

Tabla. 4 Pesos de matriz A-1*B

	Pesos Factores
Cód. Dist. Carretera	0.05
Cód. Dist. Fallas	0.08
Pendiente	0.24
Geología	0.13

De la tabla 3 y 4, se muestra el desarrollo de la matriz para obtener los pesos de cada parámetro intrínseco de la susceptibilidad a deslizamientos, obteniendo como resultado que la pendiente y la geología son los parámetros más influyentes para la estimación de zonas de deslizamientos tal como se presenta en la tabla 4.

H. Cálculo variográfico

Los mapas de la distribución espacial se diseñaron a partir de un análisis geoestadístico que consistió de las siguientes etapas:

1. Análisis exploratorio de datos para corroborar una distribución normal; en caso de no existir se hace transformación para la normalización de los datos,

2. Autocorrelación espacial. Se ajusta el semivariograma a los datos medidos.

El semivariograma se calcula de la manera siguiente:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2$$

En donde:

$\gamma(h)$ significa el valor del semivariograma experimental

$Z(x_i)$ es el parámetro en un punto georreferenciado, conocido también como variable regionalizada.

$Z(x_i + h)$ es el parámetro en un punto georreferenciado separado por una distancia h .

$N(h)$ es el número de pares de puntos medidos y separados por una distancia h . [17]

En este ítem se calculó los parámetros de los variogramas y las figuras de los variogramas experimentales en las direcciones 0° , 45° , 90° , 135° y 70° . Los parámetros de variogramas obtenidas del cálculo de los variogramas experimentales en las direcciones de 0° , 45° , 90° , 135° y 70° respectivamente, por lo que se tuvo que generar 15 figuras de modelos de variogramas experimentales haciendo las combinaciones por cada dirección los siguientes modelos variográficos teóricos como son el esférico (Sph), gaussiano (Gauss) y Exponencial (Exp), de los cuales se puede concluir que en el área de investigación el variograma experimental en la dirección de 70° se ajusta al modelo variográfico esférico (Sph) y existe una dependencia espacial hasta 1200 m tal como resultado el alcance, tal como se muestra en la figura 6.

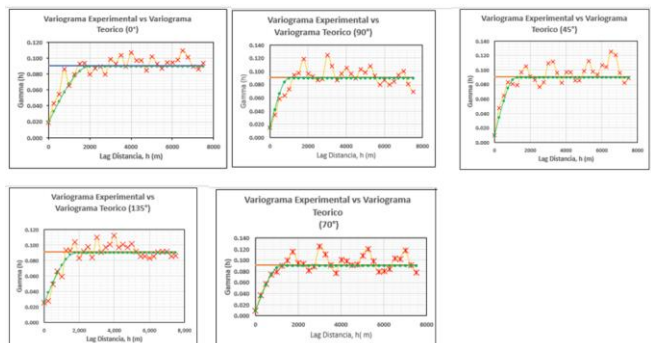


Fig. 6 Variogramas experimental y modelo teórico esférico

I. Modelación Geoestadística a susceptibilidad a deslizamientos

Para el desarrollo del mapa de susceptibilidad a deslizamientos en la zona sur en el distrito de Cajamarca, luego del inventariado de deslizamientos se codificó las variables en análisis distancia a carretera, distancia a fallas, pendiente y geología. De ello obtener, i. estadística descriptiva, ii. seguidamente estandarizar las variables consideradas, iii. Correlación entre las variables y covarianza, iv. cálculo de los pesos de cada variable, v. cálculo de valores de susceptibilidad estimados.

En el análisis variográfico, vi. Se calculó los variogramas en las direcciones 0° , 45° , 90° , 135° y 70° y por los modelos teóricos efecto pepita, esférico, gaussiano y exponencial, vii.

Del análisis se definió que se tiene mejor comportamiento estructural en N70° y al modelo esférico. Con los resultados mencionados se procedió a modelar las zonas de susceptibilidad, utilizando el modelado de 3D. El software ArcGIS versión 10.5.

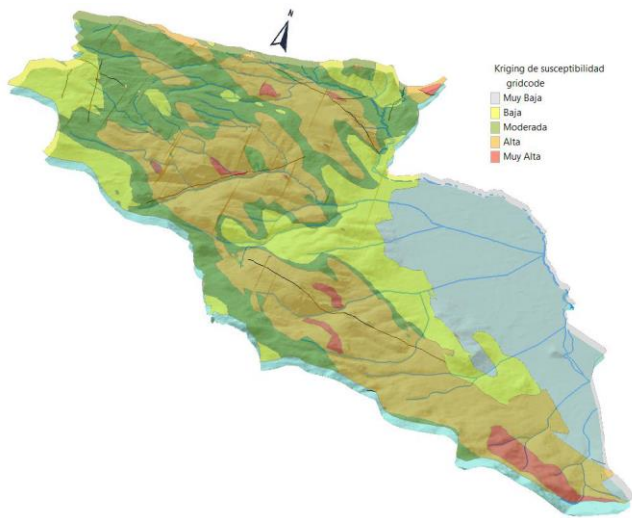


Fig. 7 Zonas de susceptibilidad

En la investigación de modelación geoestadística a la susceptibilidad a deslizamientos, se ha enfocado en estimar los pesos de las variables que intervienen en la susceptibilidad a deslizamientos. Los pesos de cada variable se muestran en la tabla 4, siendo el parámetro pendiente y geología más incidentes.

Siendo la susceptibilidad a deslizamientos un tema complejo, se ha tomado criterios para elegir los parámetros más incidentes y reducir la incertidumbre, considerando que estos parámetros son necesarios a la hora de avanzar con una aplicación práctica. La investigación se ha centrado en desarrollar la modelación geoestadística a la susceptibilidad de deslizamientos utilizando el software EXCEL para el análisis multivariable y variográfico mostrando este análisis de forma sencilla práctica. Y para la zonificación de las categorías de susceptibilidad se utilizó la técnica de kriging en el software ARCGIS.

La modelación geoestadística de susceptibilidad a deslizamientos, muestra del análisis variográfico experimental que existe dependencia espacial entre estos aproximadamente en 1200m, lo cual está determinado por el alcance o rango, los variogramas experimentales muestran una anisotropía de 70° y del análisis kriging multivariable el parámetro más influyente es la pendiente con 0,3 de peso. La geoestadística es una técnica de análisis espacial y/o temporal, por lo que puede predecir las zonas susceptibles a deslizamientos considerando multiparámetros y localizando espacialmente. Por lo que la geoestadística es una técnica más exacta para predecir las zonas de susceptibilidad a deslizamientos comparado con los métodos determinístico, probabilístico, geomorfológico y otros. Lo cual coincide con Flórez & Pérez, (2019) [18], quien menciona que: “Las técnicas híbridas en los últimos años, han mejorado el

rendimiento predictivo en comparación con modelos heurísticos y estadísticos, han ido reduciendo su margen de mejora, lo que lleva a que hoy en día aún se debata cuál es la manera más adecuada para modelar los procesos de ladera y predecir nuevas zonas susceptibles. Además, indica que en la predicción de susceptibilidad a deslizamientos se descuidado el componente espacio-temporal.

Las actuales técnicas propuestas no están construidas para modelar de manera adecuada la heterogeneidad espacio-temporal, por lo que sin la consideración de la dependencia espacio-tiempo el método resulta arbitrario, lo que hace más difícil interpretar los resultados.

La geoestadística es una técnica de análisis espacial que realiza los cálculos considerando las variables regionalizadas, multiparámetros y localizando espacialmente, de este análisis los valores estimados versus al valor real se obtuvo una similitud de 82%, al compararlo con (Palacios, 2020) [19], en su trabajo de investigación “Susceptibilidad a deslizamientos en la vía Aloag Santo Domingo, mediante Lógica Difusa” determino la susceptibilidad a deslizamientos mediante Lógica Difusa como una técnica para la zonificación e identificación de puntos críticos de peligro geológico y para ello utilizo variables como cercanía a ríos, vías, fallas geológicas y pendiente, obtuvo dos modelos, el primero lo analizo por promedio difuso, y el segundo de una mixtura entre Lógica Difusa, alcanzado un ajuste de 87.7% y 88.7% para el primero y segundo modelo respectivamente. Además, compara sus resultados con un registro de deslizamientos, de los cuales en su mayoría coinciden con las zonas críticas (75%) identificadas mediante Lógica Difusa, lo que respalda el resultado de 82% en nuestra investigación.

IV. CONCLUSIONES

La aplicación de la modelación geoestadística permitió caracterizar y zonificar de manera confiable la susceptibilidad a deslizamientos en la zona sur del distrito de Cajamarca. El análisis variográfico evidenció que el comportamiento espacial de la susceptibilidad se ajusta de manera óptima al modelo variográfico teórico esférico, presentando una anisotropía estructural dominante en la dirección N70°, lo que refleja un control geológico-estructural del fenómeno de deslizamientos en el área de estudio.

Se identificaron y jerarquizaron los factores intrínsecos condicionantes de la susceptibilidad a deslizamientos, determinándose que la pendiente y la geología son los parámetros más influyentes en la ocurrencia de estos procesos. En menor medida, pero con influencia significativa, se encuentran la distancia a fallas geológicas y la distancia a carreteras, lo que evidencia la interacción entre factores naturales y la intervención antrópica en la inestabilidad del terreno.

El análisis multivariable permitió cuantificar la contribución relativa de cada factor, obteniéndose los siguientes pesos geoestadísticos: pendiente (0,24), geología (0,13), distancia a fallas geológicas (0,08) y distancia a carreteras (0,05). Estos resultados confirman que la topografía y las características litológicas del terreno

controlan principalmente la susceptibilidad a deslizamientos en la zona de estudio.

El análisis variográfico determinó un alcance o rango de dependencia espacial de aproximadamente 1 200 m, lo que indica que dentro de esta distancia existe una correlación espacial significativa entre los valores de susceptibilidad. Este resultado es fundamental para la interpolación mediante kriging ordinario, ya que garantiza estimaciones insesgadas y con varianza mínima.

La zonificación de la susceptibilidad a deslizamientos permitió identificar áreas con alta susceptibilidad, principalmente asociadas a pendientes comprendidas entre 20° y 50°, desarrolladas sobre rocas sedimentarias, condiciones que favorecen la inestabilidad de laderas. Estas zonas representan sectores críticos que deben ser priorizados en la planificación territorial y en la gestión del riesgo geológico.

Finalmente, se concluye que la geoestadística constituye una herramienta robusta y eficiente para la evaluación de la susceptibilidad a deslizamientos, al integrar múltiples parámetros condicionantes y su comportamiento espacial. La metodología aplicada demostró una alta capacidad predictiva y un adecuado nivel de ajuste con los deslizamientos históricos, superando las limitaciones de los métodos determinísticos, geomorfológicos y heurísticos, y aportando información técnica confiable para la prevención y reducción del riesgo por deslizamientos en el distrito de Cajamarca.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la Universidad Privada del Norte por darnos la Oportunidad de trabajar este paper y poder presentarlo para su publicación.

REFERENCIAS

- [1] Olaechea, J. (6 de Marzo de 2019). Existen 171 zonas críticas en la región Cajamarca. Obtenido de Agencia Andina: <https://www.andina.pe/agencia/noticia-alerta-existen-171-zonas-criticas-la-region-cajamarca-744443.aspx>
- [2] Ramos, R. N. (2018). Estudio de la susceptibilidad al deslizamiento de laderas en el Estado de Guerrero, México, aplicando Tecnologías de Información Geográfica. Universidad Rey Juan Carlos. Obtenido de <https://burjcdigital.urjc.es/handle/10115/15869>
- [3] Grimaldi, S. (2016). Multifactor empirical mapping of the protective function of forests against landslide occurrence: statistical approaches and a case study. i Forest. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/290780896_Multifactor_empirical_mapping_of_the_protective_function_of_forests_against_landslide_occurrence_Statistical_approaches_and_a_case_study/link/56a111f608ae984c4498ca15/download
- [4] Díaz, A., Acosta, D., & Sáez, D. (2019). Mapa de susceptibilidad a deslizamientos en el distrito de San Miguelito, Panamá, incorporando herramientas de sistema de información geográfica. I + D Tecnológico, 59-70. Obtenido de https://www.researchgate.net/profile/Daniel_Acosta23/publication/330767912_Mapa_de_susceptibilidad_a_deslizamientos_en_el_distrito_de_San_Miguelito_Panamá_incorporando_herramientas_de_sistema_de_informacion_geografica/links/5d18aa37458515c11c037779/Mapa-d
- [5] Chen, W., Shahabi, H., Zhang, S., Khosravi, K., Shirzadi, A., Chapi, . . . Ahmad, B. B. (2018). Landslide Susceptibility Modeling Based on GIS and Novel Bagging-Based Kernel Logistic Regression. Applied Sciences. Obtenido de <https://www.mdpi.com/2076-3417/8/12/2540>
- [6] Mora, S., & Sanorío, J. (2018). Análisis regional de las amenazas de la inestabilidad de laderas y de la licuefacción sísmica de suelos, Costa Rica. Universidad Estatal a Distancia (UNED).
- [7] Robles, J. C. (2019). Propuesta de Zonificación Territorial ante Susceptibilidad a Deslizamientos en el Distrito Monterrey de San Carlos. Universidad de Costa Rica, Sistema de Estudios de Posgrado. Obtenido de <http://www.kerwa.ucr.ac.cr/bitstream/handle/10669/79172/Tesis%20final%2025-septiembre-19%20Juan%20Carlos%20Robles%20Rojas.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [8] Rodríguez, S. R. (2016). Método de Investigación Geológico-Geotécnico para el Análisis De Inestabilidad De Laderas Por Deslizamientos Zona Ronquillo – Corisorgona Cajamarca - Perú. Universidad Nacional Mayor de San Marcos.
- [9] Lagos, A. C. (2015). Modelamiento de la Relación Entre Los Procesos Tectónicos y La Inestabilidad En Los Terrenos De Las Zonas: Urubamba Y Tres Ríos. Cajamarca- Perú. Universidad Nacional De Cajamarca
- [10] Cenapred, M. (Septiembre de 2016). Causas Que Propician Deslizamientos y Medidas De Prevención. Obtenido de Cenapred, Mexico: <http://www.cenapred.gob.mx/es/documentosWeb/Enaproc/IdentifDeslizamientos.pdf>
- [11] Adolfo, R., & Feoli-Boraschi, S. (2018). Comparación de la metodología Mora-Vahrson y el método morfométrico para determinar áreas susceptibles a deslizamientos en la microcuenca del río Macho, Costa Rica. Revista Geográfica de América Central. Obtenido de <https://www.revistas.una.ac.cr/index.php/geografica/article/view/10677/13251>
- [12] Velasquez, A. P. (2017). Centrogeo.repositorioinstitucional.mx. doi:<https://centrogeo.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1012/164/1/20-Variables%20Regionalizadas%20-%20%20Diplomado%20en%20An%C3%A1lisis%20de%20Informaci%C3%B3n%20Geoespacial.pdf>
- [13] Pyrcz, M. (2018). Spatial Interpretation Modeling. Obtenido de Michael Pyrcz the University of Texas at Austin, Austin, Texas, USA: <http://www.michaelpyrcz.com/my-resources.html>
- [14] Aristizábal, E., Vásquez, M., & Ruíz, D. (2019). Métodos estadísticos para la evaluación de la susceptibilidad por movimientos en masa. Tecnológicas. doi:<https://doi.org/10.22430/22565337.1247>
- [15] Rosa, M. L., Sobreira, F. G., & Barella, C. F. (2021). andslide susceptibility mapping using the statistical method of Information Value: A study case in Ribeirão dos Macacos basin, Minas Gerais, Brazil. An Acad Bras Cienc.
- [16] Porras, A. (23 de 11 de 2017). Método Kriging de inferencia espacial. Obtenido de Centro Publico de Investigacion CONACYT: <https://centrogeo.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1012/160/1/16-M%C3%A9todo%20Kriging%20de%20Inferencia%20espacial%20-%20%20Diplomado%20en%20An%C3%A1lisis%20de%20Informaci%C3%B3n%20Geoespacial.pdf>
- [17] Pyrcz, M. (2018). Spatial Interpretation Modeling. Obtenido de Michael Pyrcz the University of Texas at Austin, Austin, Texas, USA: <http://www.michaelpyrcz.com/my-resources.html>
- [18] Florez García, A. C., & Pérez Castillo, J. N. (2019). Técnicas para la predicción espacial de zonas susceptibles a deslizamientos. Dialnet, 29.
- [19] Palacios, I. F. (2020). Susceptibilidad A Deslizamientos En La Vía Aloag –Santo Domingo, Mediante Lógica Difusa. GEOESPACIAL. Obtenido de <https://journal.espe.edu.ec/ojs/index.php/revista-geoespacial/article/view/1571/1392>