

Aplicación del método estadístico discriminante en la zonificación de susceptibilidad a procesos de remoción en masa, municipio de Pueblo Bello, Cesar (Colombia)

Application of the discriminant statistical method in the zoning of susceptibility to mass removal processes, municipality of Pueblo Bello, Cesar (Colombia)

Libardo J. Lascarro Navarro¹; Jesús Delgado Rodríguez²; Elías Rojas-Martínez³; Frank D. Lascarro Navarro⁴; Dino Carmelo Manco-Jaraba⁵

1. Geólogo, Universidad de Pamplona. E-mail: Libardo.lascarronavarro@gmail.com ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-0972-884X>

2. Ingeniero Geólogo, Magister en Geotecnia, Universidad de Pamplona. E-mail: jramond@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3397-6099>

3. Geólogo, Magister en Geología Económica, Fundación Universitaria del Área Andina. E-mail: eliaser@hotmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0402-1565>

4. Ingeniero Geólogo, Universidad Nacional Mayor de San Marcos. E-mail: frank.lascarro@unmsm.edu.pe
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9433-2863>

5. Ingeniero de Minas, M.Sc. Gestión Ambiental y Energética en las Organizaciones, Universidad de La Guajira. E-mail: dinomancojaraba@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8506-094X>

Cite this article as: Lascarro Navarro L., Delgado Rodríguez J., Rojas-Martínez E. E., Lascarro Navarro F., Manco-Jaraba D. C., "Aplicación del método estadístico discriminante en la zonificación de susceptibilidad a procesos de remoción en masa, municipio de Pueblo Bello, Cesar (Colombia).", *Prospectiva*, Vol. 22 N° 1 2024.

Recibido: 27/04/2023 / Aceptado: 04/10/2023

<http://doi.org/10.15665/rp.v22i1.3269>

RESUMEN

Los fenómenos de remoción en masa son potencialmente peligrosos, debido a que ocasionan daños en bienes e infraestructura de las comunidades. Por eso, existe un creciente interés gubernamental en conocer, estudiar y zonificar estos fenómenos, desarrollando proyectos e investigaciones que permitan evaluar su comportamiento. En este trabajo se obtendrá la zonificación de la susceptibilidad a fenómenos de remoción en masa, en inmediaciones del municipio de Pueblo Bello, Cesar, cuenca alta del río Ariguani, ubicada al sur occidente de la Sierra Nevada de Santa Marta. Para la ejecución de este proyecto se desarrolló el método estadístico discriminante, teniendo en cuenta los factores condicionantes y detonantes, que determinan cuantitativamente el grado de influencia que cada variable geoambiental tiene en la generación de los fenómenos de remoción en masa. Estos factores geoambientales, se realizaron mediante visita de puntos estratégicos dentro de la zona, en pro de construir mapas de geología, unidades geológicas superficiales, geomorfología, cobertura y uso del suelo, lográndose realizar un análisis que conllevó a la determinación de zonas homogéneas, mecanismos de falla, caracterización de drenajes y su relación con los fenómenos de inestabilidad. En conclusión, en el sector se presenta una mayor categoría de susceptibilidad media con un 45.46%, seguida de baja con un 20.07%, y alta con un 17.40%, la muy baja con un 10.31% y la categoría muy alta con un 6.73%. La relación con los movimientos en masa es mayor en la categoría muy alta con un 36.58%, seguida de la media con un 31.70%, la baja con 14.63%, alta con un 9.75% y la muy baja con 7.31%.

Palabras clave: Análisis discriminante, Geología, Pueblo Bello, Remoción en masa, Susceptibilidad.

ABSTRACT

Mass removal phenomena are potentially dangerous because they cause damage to property and infrastructure in communities. Therefore, there is a growing governmental interest in knowing, studying and zoning these phenomena, developing projects and research that allow evaluating their behavior. In this work, the zoning of the susceptibility to mass removal phenomena will be obtained, in the vicinity of the municipality of Pueblo Bello, Cesar, upper basin of the Ariguani River, located southwest of the Santa Marta Nevada massif. For the execution of this project, the discriminant statistical method was developed, taking into account the conditioning and triggering factors, which quantitatively determine the degree of influence that each geoenvironmental variable has on the generation of mass removal phenomena. These geoenvironmental factors were carried out by visiting strategic points within the area, in order to build maps of geology, superficial geological units, geomorphology, land cover and land use, achieving an analysis that led to the determination of homogeneous zones, failure mechanisms, characterization of drainage and its relationship with the phenomena of instability. In conclusion in the sector there is a higher category of medium susceptibility with 45.46%, followed by the low with 20.07%, the high with 17.40%, the very low with 10.31% and the very high category with 6.73%. The relationship with mass movements is higher in the very high category with 36.58%, followed by the average with 31.70%, the low with 14.63%, high with 9.75% and the very low with 7.31%.

Keywords: Discriminant analysis, Geology, Pueblo Bello, Mass removal, Susceptibility.

1. INTRODUCCIÓN

La Sierra Nevada de Santa Marta se caracteriza por su gran diversidad geomorfológica y accidentes geográficos que la conforman, debido a la influencia de factores condicionantes y/o detonantes naturales y/o antrópicos presentes [1], los fenómenos de remoción en masa son considerados como generadores de amenaza, afectando no solo las actividades básicas humanas, también pueden llegar a producir daños en bienes e infraestructuras [2], [3]. El 25 de julio de 2018 se presentaron deslizamientos en el sector de Gameke, específicamente en la finca el Higuito, ocasionándose víctimas fatales [4]. Los daños ocurridos están asociados a deforestación, quema de cobertura vegetal, geología, fallas geológicas, expansión de la frontera agrícola, lluvias súbitas, geomorfología y un relieve con predominio de pendientes que favorecen los procesos erosivos y deslizamientos, que deben ser estudiados y caracterizados [5]–[8]. Por tanto, comprender los escenarios que los propician es fundamental para la gestión del riesgo y planificación territorial. Ante esto, el Servicio Geológico Colombiano (SGC), ha realizado múltiples estudios [2], [3], [9] publicaciones y guías en diferentes escalas con el fin de categorizar los escenarios de amenaza en el territorio colombiano [10].

Según [11], el análisis discriminante es la prueba estadística más apropiada para la zonificación de susceptibilidad, ya que permite que las variables independientes o predictivas se puedan diferenciar y conocer cuántas variables son necesarias para alcanzar la mejor clasificación posible [12], [13]. Además, se puede cuantificar su poder de relación, con base en la significancia de las variables en un grupo determinado. Por ello la técnica es considerada como una prueba de clasificación y de dependencia. Su propósito es similar al análisis de regresión logística, pero la diferencia radica en que solo admite variables cuantitativas [14], [15]. La presente investigación tiene como objetivo la aplicación del método estadístico discriminante en la zonificación de susceptibilidad a procesos de remoción en masa, en el municipio de Pueblo Bello, Cesar (Colombia), como un instrumento base en los planes de ordenamiento territorial.

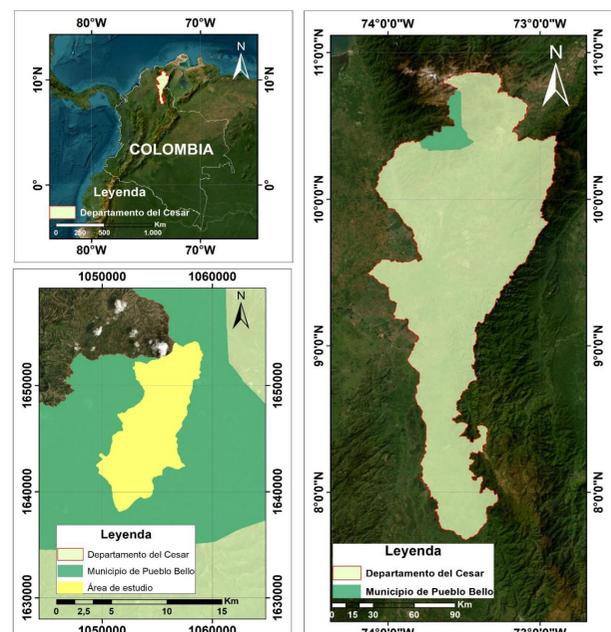
2. LOCALIZACIÓN

El municipio de Pueblo Bello se encuentra ubicado al SW de la ciudad de Valledupar, departamento del Cesar (Colombia), sobre el flanco SE de la Sierra Nevada de Santa Marta a una altitud de 1200 m.s.n.m. Es un importante centro para servicios de salud y abasto para la población Indígena de la Sierra, y un atractivo sitio turístico no solo para los habitantes del Cesar, sino, también de otras regiones de Colombia y del mundo, por tener en su jurisdicción la capital de la Cultura Arhuaca ‘Nabusímake’ El área de estudio se localiza al NW de Pueblo Bello, con un área de 7615,61ha (Figura 1).

Figura 1. Ubicación del área de estudio en Colombia, Dpto. del Cesar (derecha). Vista general del área de estudio (izquierda) utilizando la base de datos del IGAC.

Fuente: Autores.

Figure 1. Location of the study area in Colombia, Department of Cesar (right). General view of the study area (left) using the IGAC database. Source: Authors.



3. METODOLOGÍA

En la ejecución de la investigación, se tuvo como base la metodología empleada por el Servicio Geológico Colombiano (SGC) para la zonificación de susceptibilidad a escala 1:25.000 [3], identificación y evaluación de riesgos geológicos y geotécnicos en un área específica. Esta metodología se fundamenta en la recopilación de información geológica, geomorfológica, geotécnica y sísmica, así como en la implementación de estudios y análisis detallados para determinar la presencia de factores de riesgo en el sector. La información recopilada es integrada en un modelo geológico permitiendo la caracterización de las zonas con mayor probabilidad de sufrir eventos geológicos y geotécnicos, como deslizamientos de tierra, inundaciones, derrumbes, entre otros. A partir de esta información, se definen las zonas susceptibles y se clasifican en función del nivel de riesgo.

El análisis discriminante es una técnica estadística que se utiliza para identificar y clasificar un grupo de objetos o individuos, con base en un conjunto de características o variables [16]. Esta metodología es una herramienta muy útil en la identificación de zonas de amenaza. La metodología del SGC [3] recopila una amplia gama de información geológica, geotécnica, sísmica, social, económica y ambiental, utilizadas como variables para un análisis discriminante, el método se basa en dividir las variables en dos poblaciones los escarpes del terreno (estable e inestable), aplicando un conjunto de variables características (pendiente, litología, orientación, rugosidad, cobertura vegetal, entre otras variables disponibles), persigue la segregación óptima de las dos poblaciones, reduciendo la clasificación equívoca de las laderas clasificadas como estables o inestables. Las variables independientes seleccionadas durante el análisis se combinan de manera lineal y su función discriminante adopta la forma: $D = d_1V_1 + \dots + d_nV_n$. Donde D es el valor discriminante de la función, V_i son las variables independientes de mayor significación estadística y D_i son los coeficientes de clasificación estimados. En la actualidad, los sistemas de información geográfica (SIG) soportan el manejo de volúmenes grandes de información, facilitando un mejor desempeño en la aplicación de técnicas cuantitativas para el cálculo y evaluación de la susceptibilidad a procesos de remoción en masa [17]–[19]. Mediante los SIG, las variables que son analizadas se pueden obtener de forma instantánea, en algunos cálculos con un menor costo computacional, gracias a los modelos digitales de elevaciones, lo que permite que sean analizados y almacenados de manera digital. En cuanto a técnicas aceptadas dentro de la comunidad científica, se admiten varios tipos de métodos de data-driven, empleados para evaluación de susceptibilidad a deslizamientos [20] En la Tabla 1, se pueden ver diversos autores y aplicaciones estadísticas, donde se pronostican de manera cuantitativa áreas susceptibles a procesos de remoción en masa.

Tabla 1. Métodos para evaluación de susceptibilidad a deslizamientos de tipo data-driven. Fuente: [20].

Table 1. Methods for evaluating susceptibility to data-driven landslides. Source: [20].

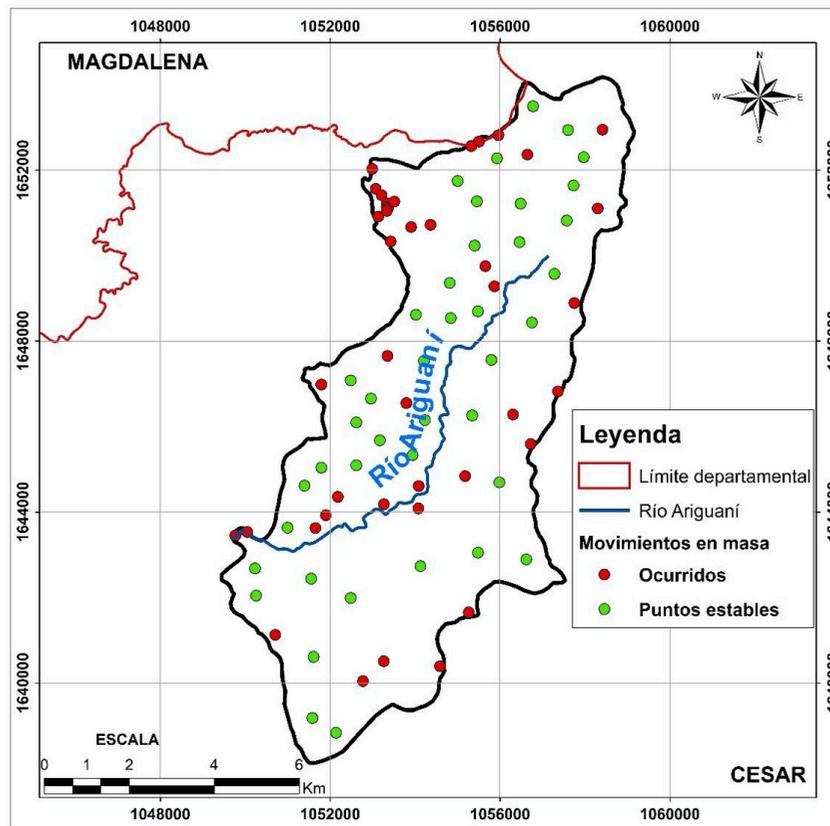
Tipo	Método	Referencia
Métodos estadísticos bivariados	Likelihood ratio model (LRM)	[21]
	Information Value Method	[22]
	Weights of evidence modelling	[23]–[25]
	Favourability functions	[26], [27]
Métodos estadísticos multivariados	Discriminant analysis	[15], [28]
	Logistic regression	[28], [29]
Métodos de caja negra	Artificial Neural Networks	[21], [30], [31]

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Inventario de deslizamientos: El inventario de deslizamientos cuenta con un set total bruto de 41 puntos georreferenciados, donde han ocurrido eventos de deslizamiento previamente, obtenidos a partir de la revisión detallada de

registros de la base de datos del Sistema de Información de Movimientos en Masa (SIMMA) [32], reconocimiento en campo y revisión multitemporal de imágenes satelitales de la zona (Figura 2).

Figura 2. Catálogo de deslizamientos de la cuenca alta del río Ariguani. Fuente: Autores
Figure 2. Catalog of landslides in the upper Ariguani river basin. Source: Authors.



Factores de propensividad: Utilizando la información recolectada en campo, del SIMMA, y de las imágenes satelitales, se seleccionaron 13 factores potenciales, agrupados en tres grandes grupos, 1. Suelos/Geología; 2. Topografía; y 3. Clima. Los factores así obtenidos se explican brevemente en la Tabla 2 y se muestran en las Figuras 3, 4, 5 y 6.

En las figuras 3, 4, 5 y 6, se observa que el área de estudio cuenta con pendientes que oscilan entre los 0° a 79° , estando ubicadas las de mayor pendiente en la parte N y NE; las pendientes más bajas se ubican en la parte centro y sur del área de estudio (Figura 3C); en la zona centro y norte se identificaron estructuras de tipo falla, como la falla de cabalgamiento Tierra Nueva con orientación NE-SW, ubicada al norte de la zona, seguida de un lineamiento con orientación NW-SE, la falla de rumbo dextral Ariguani en la zona centro, con orientación SE-SW; seguidas de las fallas de tipo normal falla quebrada GanaAna de orientación NE-SW y la falla Quebrada Los Antiguos con orientación NW-SE (Figura 4 A). Cuenta con un clima variable entre húmedo a semihúmedo (Figura 4 B), con precipitaciones de 1000 2500 mm (Figura 4 C), además se muestran las diferentes subunidades geomorfológicas, en las que hay prevalencia de un ambiente geomorfológico estructural. En donde las subunidades más prevalecientes son Ss – Sierra, Sce - Cerro Estructural, Sesla - Espolón de longitud larga, Dlres - Lomo residual y Dlpd - Lomeríos poco disectados, cada una con extensión de más de 500 ha en total (Figura 4 D). se identificaron 4 unidades geológicas en la zona: TJg - Formación Guatapurí con una extensión de 479,61 ha, seguido de Qt - Terraza Aluvial con 853,99 ha, también Jlc - Ignimbrita de Los Clavos con 2904,88 y por último la Unidad con más extensión en el área (Batolito de Patillal) Jpbp-cm - Facie Cuarzomonzonita con 3399,34 ha (Figura 5). La distancia media del río Ariguani es tomada en cuenta para la interpretación de procesos de saturación del suelo, lo que puede ayudar a la producción de deslizamientos (Figura 6).

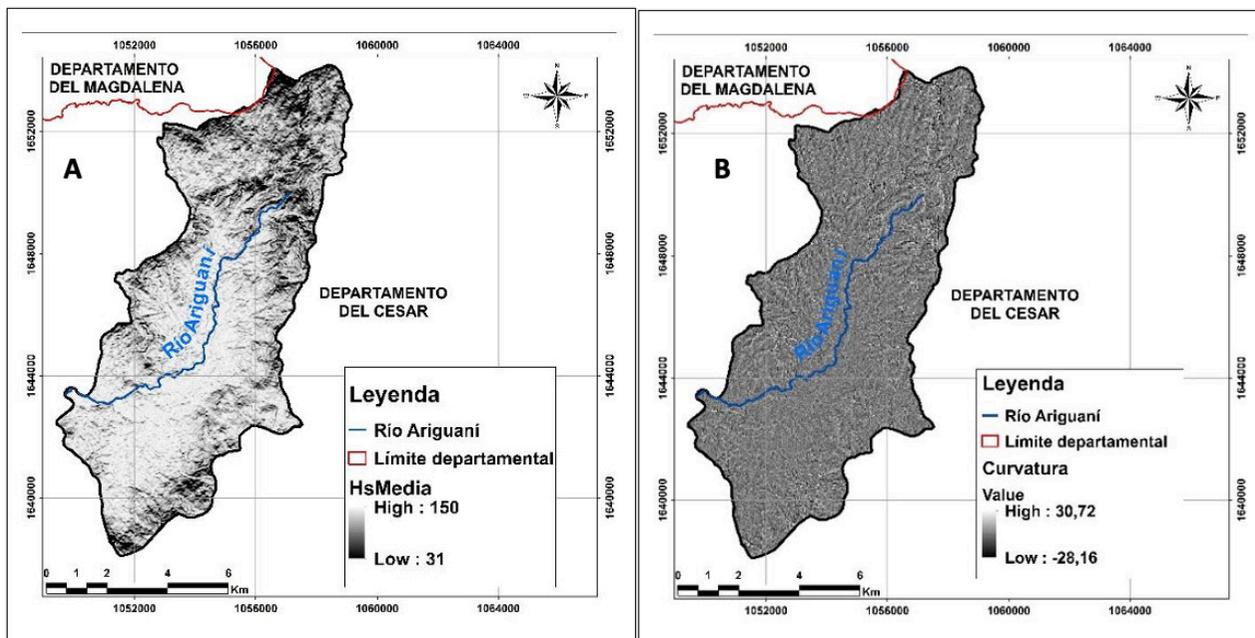
Tabla 2. Factores causales de deslizamiento en la cuenca alta del Río Ariguani. Fuente: Autores
Table 2. Causal factors of landslides in the upper Ariguani River basin. Source: Authors.

Variable	Factor Causal	Tipo
Ari_Dist	Mapa de distancia media del rio Ariguani	Topografía
HS_Med	Mapa de sombras	Topografía
Curv_Med	Curvatura media	Topografía
Pendientes	Mapa de pendientes	Topografía
Orientación	Mapa de orientación	Topografía
Faults	Mapa de fallas	Suelos/Geología
Clima	Mapa climático	Clima
Preci_med	Mapa de precipitación media mensual	Clima
UGS	Mapa de unidad geológica superficial	Suelos/Geología
UGM	Mapa de subunidades geomorfológicas	Suelos/Geología
U_Geo	Mapa de unidades geológicas	Suelos/Geología
Cober	Mapa de uso y cobertura del suelo	Suelos/Geología
DEM	Mapa de modelo de elevación Digital del terreno	Topografía

El municipio de Pueblo Bello registra procesos erosivos que oscilan de 10 a 100 t/ha/año, destacando las zonas con mayor preponderancia morfológica (zonas de mayor pendiente) de moderadas a muy altas y una extensión aproximada de 120.000 Ha; siendo la categoría moderada la de mayor connotación en esta zona con pérdidas de suelo anual con valores de 26 a 50 t/ha.

La cuenca alta del río Ariguani, presenta un ambiente geomorfológico predominantemente estructural (53.97%) y denudacional (32.86%) cuya asociación con los movimientos en masa equivale el 87.8%, donde las subunidades geomorfológicas más afectadas por movimientos en masa pertenecientes al ambiente estructural son los espolones, asimismo el ambiente denudacional se encuentran con mayor asociación en los lomos residuales.

Figura 3. A: Mapa de Sombras. B: Mapa de Curvaturas. C: Mapa de Pendientes. D: Mapa de Orientación. Fuente: Autores
Figure 3. A: Shadow Map. B: Curvature Map. C: Slope Map. D: Orientation Map. Source: Authors.



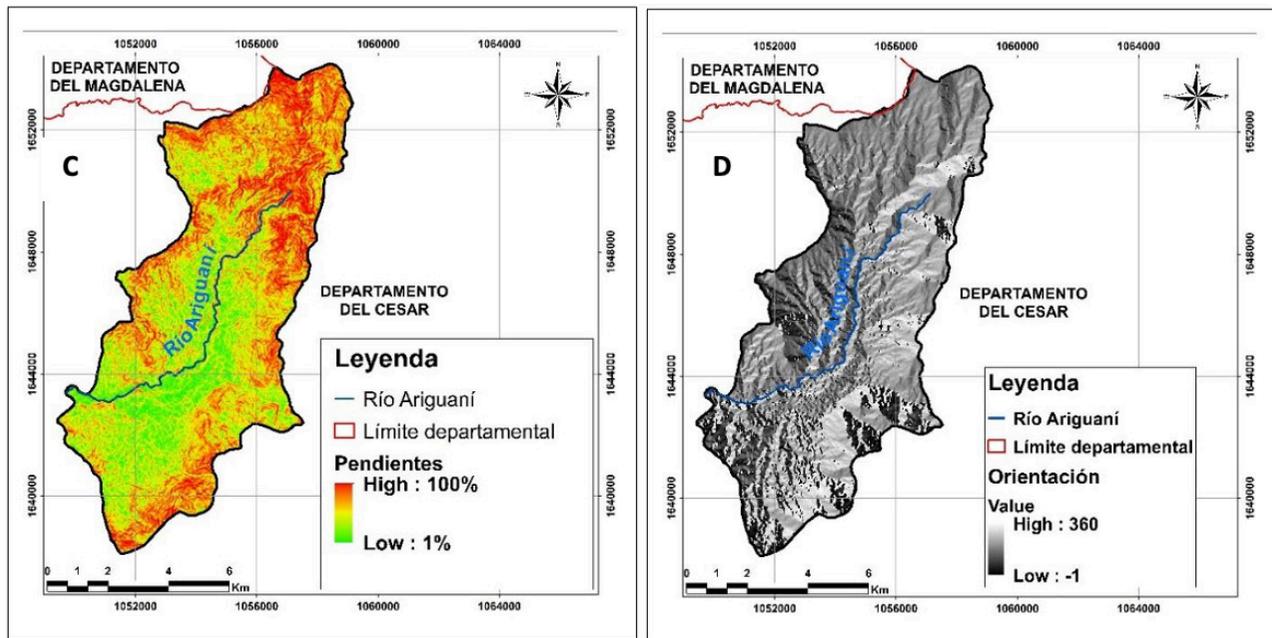


Figura 4. A: Mapa de Fallas. B: Mapa de Climático. C: Mapa de Precipitaciones. D: Mapa de Unidades geológicas superficiales. Fuente: Autores.

Figure 4. A: Fault Map. B: Climate Map. C: Precipitation Map. D: Map of superficial geological units. Source: Authors.

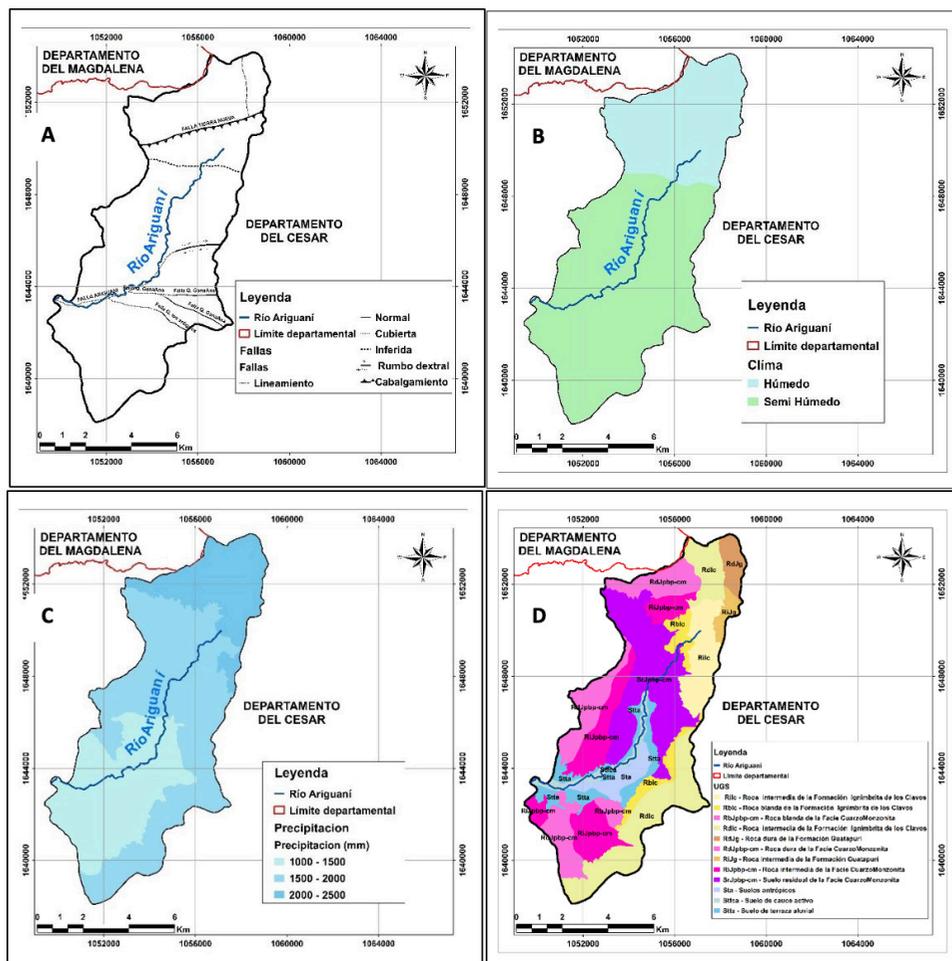


Figura 5. A: Mapa de subunidades geomorfológicas. B: Mapa de Uso y cobertura del suelo. C: Mapa Geológico. D: Mapa de Modelo de elevación digital. Fuente: Autores.

Figure 5. A: Map of geomorphological subunits. B: Land use and land cover map. C: Geologic Map. D: Digital elevation model map. Source: Authors.

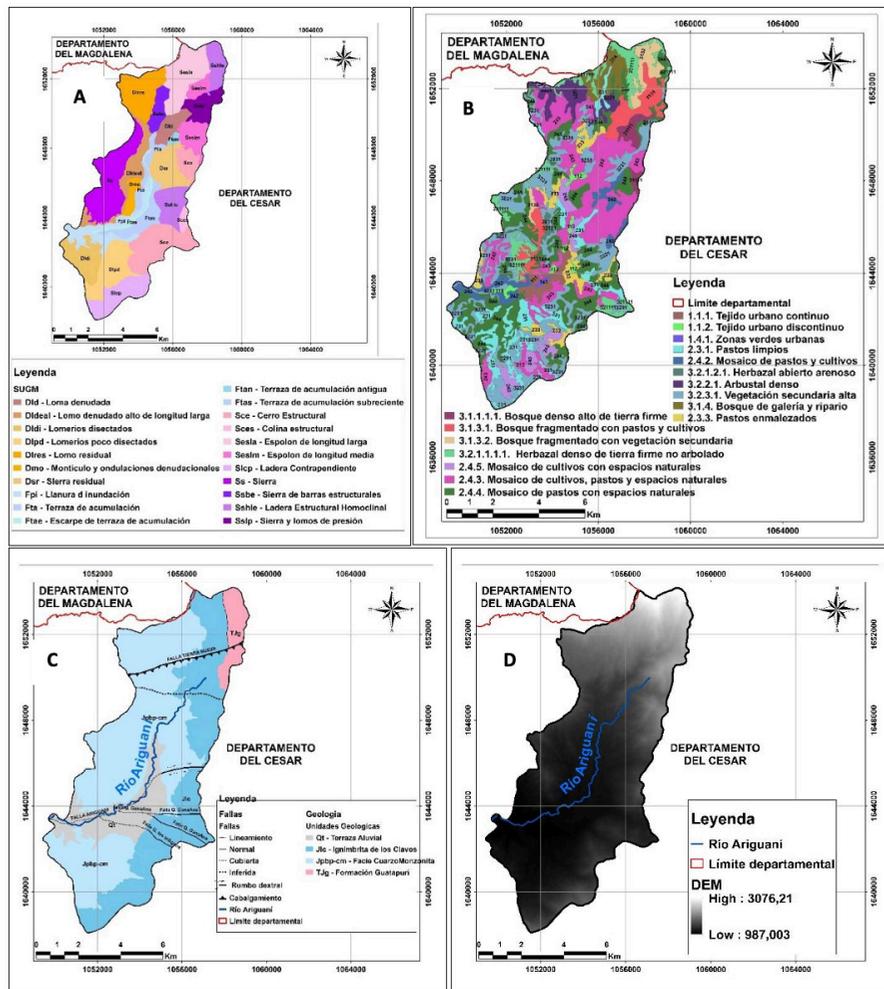
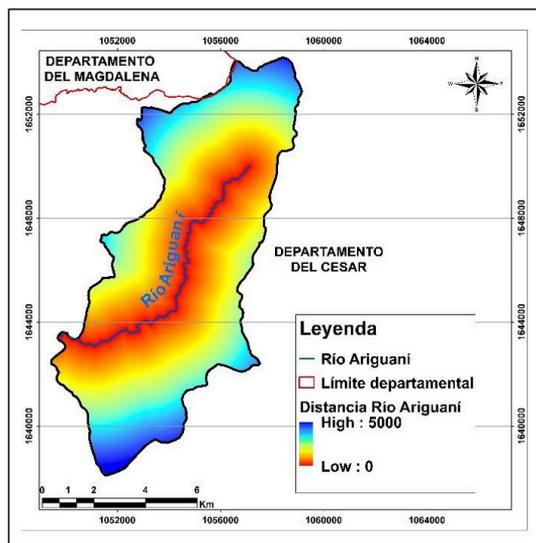


Figura 6. Mapa de distancia media del río Ariguani. Fuente: Autores.

Figure 6. Average distance map of the Ariguani river. Source: Authors.



Muestra de análisis: A partir de los 41 eventos localizados en el área se establecieron dos grupos, el primero de puntos inestables, que hacen parte del catálogo. El otro grupo constituido 41 puntos elegidos aleatoriamente en el área, donde no hay eventos registrados, siendo clasificados como puntos estables. En total se obtuvieron 82 puntos que conforman la muestra de análisis estable (desl=0) y ocurrido (desl=1).

Función discriminante de susceptibilidad a deslizamientos: Es posible elaborar varios modelos a partir de diferentes combinaciones de variables. Se utilizaron inicialmente todas las variables para generar un primer modelo, que posteriormente al valorar se excluirán en modelos posteriores. La construcción del primer modelo se dio inicialmente haciendo un análisis de correlaciones, con el propósito de remover variables redundantes, es decir, que son altamente correlacionadas con los datos, posteriormente se calculó la matriz de correlaciones que aparece en la Tabla 3, existen algunos factores que presentan altas correlaciones; en este caso debe analizarse por pares, identificando la variable que sea conveniente conservar y cuál debe descartarse. Las variables con más fuerte correlación se muestran en la Tabla 4. El test de igualdad de medias entre grupos, que mide el potencial de cada variable independiente antes de que el modelo sea creado. Cada test muestra el resultado de un análisis one-way ANOVA para la variable independiente, usando la variable de agrupación como factor estable (desl=0) y ocurrido (desl=1)). Si el valor de significancia es mayor a 0.10, la variable probablemente no contribuye al modelo. Los valores Lambda de Wilks son otra medida del potencial de la variable. Valores pequeños indican que la variable es mejor discriminando entre grupos. Los valores de Lambda de Wilks y el F de Fisher para cada variable se presentan en la Tabla 5.

Tabla 3. Matriz de correlaciones. Fuente: Autores.

Table 3. Correlation matrix. Source: Authors.

	Ari_Dist	Faults	HS_Med	Curv_Med	DEM	Pendientes	Orientación	CLIMA	Preci_med	UGS	UGM	U_Geo	COBERTURA
Ari_Dist	1,000	0,222	-0,288	-0,076	0,637	0,206	-0,233	-0,405	-0,572	-0,209	0,422	0,224	0,118
Faults	0,222	1,000	0,120	-0,152	-0,094	-0,159	-0,275	0,062	-0,024	-0,086	0,231	1,000	0,030
HS_Med	-0,288	0,120	1,000	-0,078	-0,375	-0,398	-0,013	0,320	0,337	0,056	-0,056	0,125	-0,031
Curv_Med	-0,076	-0,152	-0,078	1,000	-0,025	0,133	0,064	0,057	-0,001	0,095	-0,010	-0,154	-0,216
DEM	0,637	-0,094	-0,375	-0,025	1,000	0,307	-0,023	-0,824	-0,884	-0,071	0,022	-0,044	0,254
Pendientes	0,206	-0,159	-0,398	0,133	0,307	1,000	-0,025	-0,225	-0,391	0,019	-0,110	-0,155	0,044
Orientación	-0,233	-0,275	-0,013	0,064	-0,023	-0,025	1,000	-0,051	0,070	0,174	0,021	-0,225	0,095
CLIMA	-0,405	0,062	0,320	0,057	-0,824	-0,225	-0,051	1,000	0,805	0,335	0,102	0,074	-0,318
Preci_med	-0,572	-0,024	0,337	-0,001	-0,884	-0,391	0,070	0,805	1,000	0,066	0,036	-0,023	-0,233
UGS	-0,209	-0,086	0,056	0,095	-0,071	0,019	0,174	0,335	0,066	1,000	0,017	-0,084	-0,180
UGM	0,422	0,231	-0,056	-0,010	0,022	-0,110	0,021	0,102	0,036	0,017	1,000	0,232	0,097
U_Geo	0,224	1,000	0,125	-0,154	-0,044	-0,155	-0,225	0,074	-0,023	-0,084	0,232	1,000	0,028
COBERTURA	0,118	0,030	-0,031	-0,216	0,254	0,044	0,095	-0,318	-0,233	-0,180	0,097	0,028	1,000

Tabla 4. Variables con correlación alta. Fuente: Autores.

Table 4. Variables with high correlation. Source: Authors.

Faults - U_geo	0,890
DEM-Ari_Dist	0,637
Clima-precip	0,805
DEM-Preci_med	-0,884
Dem-Clima	-0,824

Tabla 5. Test de igualdad media entre grupos. Fuente: Autores.

Table 5. Mean equality test between groups. Source: Authors.

	Lambda de Wilks	F	gl1	gl2	Sig.
UGM	0,850	12,659	1	72	0,001
Faults	0,997	0,200	1	72	0,656
Ari_Dist	0,926	5,717	1	72	0,019
Pendientes	0,991	0,682	1	72	0,412
DEM	0,991	0,660	1	72	0,419
UGS	0,995	0,395	1	72	0,532
U_Geo	0,997	0,239	1	72	0,627
Curv_Med	0,997	0,183	1	72	0,670
COBERTURA	0,998	0,167	1	72	0,684
CLIMA	0,999	0,074	1	72	0,786
Orientación	1,000	0,030	1	72	0,864
Preci_med	1,000	0,026	1	72	0,871
HS_Med	1,000	0,007	1	72	0,935

El análisis de varianza lleva a seleccionar las variables Faults, Prec_med, U_Geo, UGM, UGS, Clima y Cobertura, dado a su alta influencia discriminante.

La correlación de los predictores o colinealidad se evaluó usando la matriz de covarianza entre grupos (Tabla 6). Una inspección de la correlación de las covarianzas muestra las correlaciones altas entre los predictores Clima-Prec_Med.

Tabla 6. Correlación de covarianzas. Fuente: Autores.

Table 6. Correlation of covariances. Source: Authors.

	Faults	Prec_Med	U_Geo	UGM	UGS	Clima	Cobertura
Faults	1,000	0,102	-0,036	0,188	0,119	0,136	-0,133
Prec_Med	0,102	1,000	-0,343	0,103	0,240	0,904	-0,053
U_Geo	-0,036	-0,343	1,000	0,175	-0,276	-0,260	-0,107
UGM	0,188	0,103	0,175	1,000	0,043	0,120	0,030
UGS	0,119	0,240	-0,276	0,043	1,000	0,261	0,189
Clima	0,136	0,904	-0,260	0,120	0,261	1,000	-0,048
Cobertura	-0,133	-0,053	-0,107	0,030	0,189	-0,048	1,000

El test Box's M, se utilizó para probar la homogeneidad de las matrices de covarianza, chequeando así la supuesta igualdad de covarianzas entre grupos. Los logs determinantes (Tabla 7) son una medida de la variabilidad de los grupos. Valores altos corresponden a grupos más variables. Diferencias grandes en los valores indican que los grupos tienen diferentes matrices de covarianza. Los logaritmos naturales y los rangos determinantes impresos son los de las matrices de covarianzas de grupo (donde a = Singular).

Tabla 7. chequeo de homogeneidad de covarianzas. Fuente: Autores.

Table 7. Covariance homogeneity check. Source: Authors.

Logaritmo de los determinantes		
Desl	Rango	Logaritmo del determinante
0	7	-5,614
1	6	. ^a
Dentro de grupos combinados	7	-5,895

Lambda de Wilks (Tabla 8), es una medida del modo en que cada función separa los casos en grupos. Es igual a la proporción de varianza total en los coeficientes discriminantes no explicada por diferencias entre los grupos. Pequeños valores de lambda indican gran poder discriminante de la función. El Chi-cuadrado asociado chequea la hipótesis de que las medias de las funciones son iguales entre grupos. Valores pequeños de Sig. Indican que la función discriminante tiene resultados mejores que el azar en la separación entre grupos [14].

Tabla 8. Lambda de Wilks para el modelo general. Fuente: Autores.

Table 8. Wilks' Lambda for the general model. Source: Authors.

Lambda de Wilks				
Prueba de funciones	Lambda de Wilks	Chi-cuadrado	gl	Sig.
1	,813	15,850	7	,027

La tabla de valores propios (Tabla 9) proporciona información sobre la eficacia de la función discriminante. Cuando existen dos grupos, la correlación canónica es la medida más útil en la tabla, y es equivalente a la correlación de Pearson entre los coeficientes discriminantes y los grupos.

Tabla 9. Valores propios y correlación para la función discriminante. Fuente: Autores.

Table 9. Eigenvalues and correlation for the discriminant function. Source: Authors.

Autovalores				
Función	Autovalor	% de varianza	% acumulado	Correlación canónica
1	,230 ^a	100,0	100,0	0,433

La matriz de estructura (Tabla 10) muestra la correlación de cada predictor con la función discriminante y constituye una prueba de la importancia que cada variable tiene dentro del modelo. El orden en esta matriz es igual al sugerido por el test de igualdad de medias grupales y es diferente del que aparece en la tabla de coeficientes estandarizados que constituye la ecuación del modelo lineal.

Tabla 10. Matriz de estructura del modelo. Fuente: Autores.

Table 10. Model structure matrix. Source: Authors.

Clima	-,421
UGM	,402
U_Geo	-,399
Cobertura	,381
Fallas	,284
UGS	,276
Prec_Med	-,264

El modelo lineal obtenido con la función discriminante se ensambla con los coeficientes canónicos de la Tabla 11.

La Tabla 12 resume los resultados del modelo inicial en cuanto a capacidad de clasificación de casos. Puede leerse que el modelo acierta en la clasificación del 74.4% de las celdas estables, clasifica correctamente el 75.6% de las celdas inestables, y en total, tiene un acierto del 75% de casos.

Tabla 11. Coeficientes de la función discriminante. Fuente: Autores.

Table 11. Coefficients of the discriminant function. Source: Authors.

Fallas	,631
Prec_Med	,434
U_Geo	-,828
UGM	,380
UGS	,307
Clima	-2,135
Cobertura	,196
(Constante)	1,381

Tabla 12. Resultados de clasificación del modelo inicial. Fuente: Autores.

Table 12. Classification results of the initial model. Source: Authors.

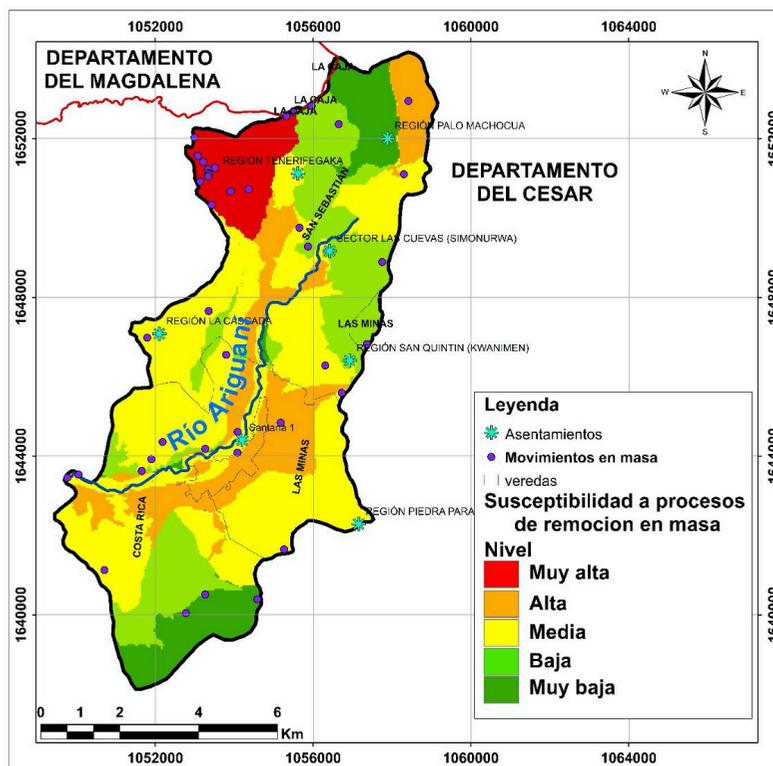
Función discriminante		Catálogo	Resultados de la clasificación		Total
			0	1	
Original	Recuento	0	30	11	41
		1	10	31	41
	%	0	73,2	26,8	100,0
		1	24,4	75,6	100,0
Validación cruzada	Recuento	0	27	14	41
		1	12	29	41
	%	0	65,9	34,1	100,0
		1	29,3	70,7	100,0

La ecuación lineal obtenida (Ecuación 1) se ha aplicado a toda el área bajo estudio y sus valores se han normalizado entre 0 y 1. Este procedimiento hace que la asignación posterior de categorías de susceptibilidad sea más sencilla. El mapa resultado de esta clasificación se presenta a continuación (Figura 7). Se genera un mapa ráster con valores entre cero y uno que refleja el grado relativo de susceptibilidad de cada celda del terreno.

Ecuación 1

$$Susceptibilidad = (Fallas * ,631 + Pre_{Med} * ,434 - U_{Geo} * ,828 + UGM * ,380 + UGS * ,307 - Clima * 2,135 + cobertura * ,196) * 1,381$$

Figura 7. Mapa de susceptibilidad a procesos de remoción en masa. Fuente: Autores.
Figure 7. Map of susceptibility to mass removal processes. Source: Authors.



5. CONCLUSIONES

Para la planificación de un territorio es necesario un dimensionamiento y cuantificación como pasos iniciales para una gestión adecuada. Aunque en la literatura hay muchos enfoques cualitativos para valoraciones, y tradicionalmente han resultado varios modelos, en su mayoría prefieren el uso de análisis cuantitativos, ya que permiten suprimir la subjetividad en las variables en las áreas de estudios, haciendo posible la comparación directa en los niveles de susceptibilidad y amenaza. Por otro lado, es la única manera de hacer cálculos posteriores de amenaza, en términos de probabilidad de ocurrencia, y riesgo, hablando enteramente de niveles de pérdidas.

El análisis discriminante es una opción muy efectiva para el cálculo de susceptibilidad, sin embargo, a lo largo del tiempo se ha preferido otros métodos como el WofE (peso de evidencia) que suele ser muy bueno a nivel regional, pero a escala local se queda corto en los detalles, por esta razón el insumo entregado en este trabajo va a ser de mucha ayuda en los planes de ordenamiento territorial futuros dentro del municipio de Pueblo Bello, Cesar.

El sector presenta una mayor categoría de susceptibilidad media con un 45.46%, seguida de la baja con un 20.07%, alta con un 17.40%, la muy baja con un 10.31% y la categoría para muy alta con un 6.73%. La relación con los movimientos en masa es mayor en la categoría muy alta con un 36.58%, seguida de la media con un 31.70%, la baja con 14.63%, alta con un 9.75% y la muy baja con 7.31%.

El estudio de susceptibilidad a procesos de remoción en masa es una herramienta que permite identificar las zonas más propensas a sufrir deslizamientos. Beneficiando a la comunidad del casco urbano de Pueblo Bello, así mismo como a las comunidades de los resguardos indígenas, al proporcionar información valiosa para la planificación territorial, la gestión del riesgo, la conservación ambiental y el desarrollo sostenible. Además, se puede determinar qué áreas son más vulnerables a estos procesos lo que permitirá a gobiernos locales generar medidas que puedan reducir su ocurrencia o su impacto. mejorando la seguridad, el bienestar y la resiliencia de la comunidad frente a estos eventos naturales.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICA

- [1] R. Dwawiko-Robles and D. Flórez-Goyeneche, “Aprestamiento, diagnóstico, prospectiva y zonificación ambiental de la microcuenca hidrográfica arroyo molino en la sierra nevada de Santa Marta,” Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas, 2015.
- [2] G. Ávila Álvarez et al., Guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa. Bogotá D.C., Colombia: Servicio Geológico Colombiano, 2016. [Online]. Available: <https://libros.sgc.gov.co/index.php/editorial/catalog/book/32>
- [3] Servicio Geológico Colombiano, Guía metodológica para la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1: 25.000. Bogotá D.C., Colombia, 2017.
- [4] G. Rengifo, “Deslizamientos y daños por Tormenta ocurridos en la región,” Valledupar, Cesar (Colombia), 2018.
- [5] M. Serpa-Silva, “Estudio de riesgo por fenómenos de erosión y remoción en masa en el flanco oeste del cerro Dunarúa y zona urbana del corregimiento de Guatapurí, Valledupar, Cesar,” Fundación Universitaria del Área Andina, 2017. [Online]. Available: [https://digitk.areandina.edu.co/bitstream/handle/areandina/955/Estudio de riesgo por fenómeno de erosión y remoción en masa en el flanco.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://digitk.areandina.edu.co/bitstream/handle/areandina/955/Estudio%20de%20riesgo%20por%20fenomeno%20de%20erosion%20y%20remocion%20en%20masa%20en%20el%20flanco.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- [6] C. Valdés Fernández, J. Baró Suárez, P. Flores Olvera, and R. Franco Plata, “Propuesta de umbrales críticos de precipitaciones detonantes de procesos de remoción en masa, caso de estudio: Estado de México,” *Rev. Geográfica América Cent.*, vol. 2, no. 69, pp. 225–255, 2022, doi: 10.15359/rgac.69-2.8.
- [7] C. Cardozo, G. Toyos, and V. Baumann, “Landslide susceptibility zonation in the tartagal river basin, Sierras Subandinas, Salta, Argentina,” *Andean Geol.*, vol. 48, no. 1, pp. 75–93, 2021, doi: 10.5027/and-geov48n1-3242.
- [8] D. Quiroga, A. Coronato, G. Ángeles, and H. del Valle, “Zonificación de áreas susceptibles a procesos erosivos en laderas desencadenados por la ganadería extensiva, Tierra del Fuego, Argentina,” *Rev. Univ. Geogr.*, vol. 29, no. 2, pp. 75–94, 2021, doi: 10.52292/j.rug.2020.29.2.0009.
- [9] E. Pinto Blanco, “Análisis de vulnerabilidad por el fenómeno de remoción en masa en la vereda San Luis, municipio de Silvania Cundinamarca,” Universidades de la Salle, 2016. [Online]. Available: <https://www.infodesign.org.br/infodesign/article/view/355%0Ahttp://www.abergo.org.br/revista/index.php/ae/article/view/731%0Ahttp://www.abergo.org.br/revista/index.php/ae/article/view/269%0Ahttp://www.abergo.org.br/revista/index.php/ae/article/view/106>
- [10] O. Forero-Ospino and W. Duarte-Delgado, “Caracterización e identificación de la geomorfología (ambientes y unidades geomorfológicas) en la plancha 121 - Cerrito, Colombia, aplicado a movimientos en masa, escala 1:100.000,” *Bol. Geol.*, vol. 41, no. 2, pp. 35–44, 2019, doi: 10.18273/revbol.v41n2-2019002.
- [11] M. Torrado-Fonseca and V. Berlanga-Silvente, “Análisis Discriminante mediante SPSS,” *Reire, Rev. d'innovació i Recer. en Educ.*, vol. 6, no. 2, pp. 150–166, 2013, doi: 10.1344/reire2013.6.26210.
- [12] E. Aristizábal-Giraldo, M. Vasquez Guarín, and D. Ruíz, “Métodos estadísticos para la evaluación de la susceptibilidad por movimientos en masa,” *TecnoLógicas*, vol. 22, no. 46 SE-Artículos de investigación, pp. 39–60, Sep. 2019, doi: 10.22430/22565337.1247.

- [13] G. Legorreta-Paulín, R. Alanís Anaya, L. Arana-Salinas, and F. Aceves-Quesada, “Evaluación de la eficiencia de predicción a deslizamientos usando un modelo cartográfico-hidrológico: caso de estudio Cuenca la Carbonera, flanco SE del Volcán Pico de Orizaba Evaluation,” *Investig. Geogr.*, vol. 95, 2018, doi: 10.14350/rig.58387.
- [14] C. Baeza and J. Corominas, “Assessment of shallow landslide susceptibility by means of multivariate statistical techniques,” *Earth Surf. Process. Landforms*, vol. 26, no. 12, pp. 1251–1263, Nov. 2001, doi: <https://doi.org/10.1002/esp.263>.
- [15] A. Carrara, “Multivariate models for landslide hazard evaluation,” *J. Int. Assoc. Math. Geol.*, vol. 15, no. 3, pp. 403–426, 1983, doi: 10.1007/BF01031290.
- [16] R. Fisher, “The Use of Multiple Measurements in Taxonomic Problems,” *Ann. Eugen.*, vol. 7, no. 2, pp. 179–188, Sep. 1936, doi: <https://doi.org/10.1111/j.1469-1809.1936.tb02137.x>.
- [17] S. Bianchini, M. Del Soldato, L. Solari, T. Nolesini, F. Pratesi, and S. Moretti, “Badland susceptibility assessment in Volterra municipality (Tuscany, Italy) by means of GIS and statistical analysis,” *Environ. Earth Sci.*, vol. 75, no. 10, p. 889, 2016, doi: 10.1007/s12665-016-5586-5.
- [18] J. Jiménez-Perálvarez, “Análisis de la susceptibilidad a los movimientos de ladera mediante un SIG en la cuenca vertiente al embalse de rules, granada,” Universidad de Granada, 2005. [Online]. Available: https://www.ugr.es/~ren03366/DEA/TEMAS/memoria/DEA_J.Jimenez.pdf
- [19] N. Santacana, C. Baeza, J. Corominas, A. de Paz, and J. Marturià, “Análisis de la susceptibilidad de las laderas a producir deslizamientos superficiales,” in *Análisis de deslizamientos superficiales*, 2003, pp. 61–172. [Online]. Available: [file:///C:/Users/DINO/Downloads/07CAPITULO31_unlocked\(1\).pdf](file:///C:/Users/DINO/Downloads/07CAPITULO31_unlocked(1).pdf)
- [20] J. Corominas et al., “Recommendations for the quantitative analysis of landslide risk,” *Bull. Eng. Geol. Environ.*, vol. 73, no. 2, pp. 209–263, 2014, doi: 10.1007/s10064-013-0538-8.
- [21] S. Lee, J.-H. Ryu, J.-S. Won, and H.-J. Park, “Determination and application of the weights for landslide susceptibility mapping using an artificial neural network,” *Eng. Geol.*, vol. 71, no. 3, pp. 289–302, 2004, doi: [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(03\)00142-X](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(03)00142-X).
- [22] K. Yin and T. Yan, “Statistical prediction model for slope instability of metamorphosed rocks,” in *Proceedings of the 5th International Symposium on Landslides*, 1988, vol. 2, pp. 1269–1272.
- [23] C. Van Westen, *Application of geographic information systems to landslide hazard zonation*, Volumen 1. 1993.
- [24] G. Bonham-Carter, *Geographic information systems for geoscientists: modelling with GIS*, no. 13. Elsevier, 1994. doi: <https://doi.org/10.1016/C2013-0-03864-9>.
- [25] M. L. Süzen and V. Doyuran, “Data driven bivariate landslide susceptibility assessment using geographical information systems: a method and application to Asarsuyu catchment, Turkey,” *Eng. Geol.*, vol. 71, no. 3, pp. 303–321, 2004, doi: [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(03\)00143-1](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(03)00143-1).
- [26] C.-J. F. Chung and A. G. Fabbri, “The representation of geoscience information for data integration,” *Nonrenewable Resour.*, vol. 2, no. 2, pp. 122–139, 1993, doi: 10.1007/BF02272809.

- [27] L. Luzi and A. Fabbri, "Application of Favourability Modelling to Zoning of Landslide Hazard in the Fabriano Area, Central Italy," in Joint European Conference and Exhibition on Geographical Information, 1995, pp. 398–403.
- [28] P. Gorsevski, P. Gessler, and R. Foltz, "Spatial Prediction of Landslide Hazard Using Discriminant Analysis and GIS," GIS Rockies 2000 Conf. Work. Appl. 21st Century, p. 10, 2000.
- [29] G. C. Ohlmacher and J. C. Davis, "Using multiple logistic regression and GIS technology to predict landslide hazard in northeast Kansas, USA," Eng. Geol., vol. 69, no. 3, pp. 331–343, 2003, doi: [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(03\)00069-3](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(03)00069-3).
- [30] L. Ermini, F. Catani, and N. Casagli, "Artificial Neural Networks applied to landslide susceptibility assessment," Geomorphology, vol. 66, no. 1, pp. 327–343, 2005, doi: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2004.09.025>.
- [31] D. P. Kanungo, M. K. Arora, S. Sarkar, and R. P. Gupta, "A comparative study of conventional, ANN black box, fuzzy and combined neural and fuzzy weighting procedures for landslide susceptibility zonation in Darjeeling Himalayas," Eng. Geol., vol. 85, no. 3, pp. 347–366, 2006, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2006.03.004>.
- [32] Servicio Geológico Colombiano, "Sistema de Información de Movimientos en Masa," 2023. <https://simma.sgc.gov.co/#/public/results/> (accessed Apr. 22, 2023).