

Caracterización geofísica y zonificación de amenaza por remoción en las laderas entre los km 21 a 23 de la vía Zanjón-Pueblo Bello, Cesar*

Anngy Carolina Martínez López^a ■ María Laura Moscote Bracho^b ■ Rafael Eduardo Moscote Bracho^c ■ Luis Carlos Tapia Vela^d ■ Luis Alberto Quintero López^e ■ Elías Ernesto Rojas Martínez^f ■ Frank David Lascarro Navarro^g ■ Dino Carmelo Manco Jaraba^h

* Artículo de investigación.

- a Ingeniero geólogo de la Fundación Universitaria del Área Andina, Valledupar, Colombia. Fundación Universitaria del Área Andina. Valledupar, Colombia.
Correo electrónico: amartinezlopez117@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-8842-2834>
- b Ingeniero geólogo de la Fundación Universitaria del Área Andina, Valledupar, Colombia. Fundación Universitaria del Área Andina. Valledupar, Colombia.
Correo electrónico: mmoscote2@estudiantes.areandina.edu.co;
ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-2243-0339>
- c Ingeniero geólogo de la Fundación Universitaria del Área Andina, Valledupar, Colombia. Fundación Universitaria del Área Andina Valledupar, Colombia.
Correo electrónico: rmoscote2@estudiantes.areandina.edu.co;
ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-3978-1944>
- d Especialización en Gestión Ambiental. Docente de la Fundación Universitaria del Área Andina. Valledupar, Colombia. Fundación Universitaria del Área Andina. Valledupar, Colombia.
Correo electrónico: ltapia2@areandina.edu.co; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8652-2667>
- e Magíster en desarrollo Sostenible y Medio Ambiente. Docente de la Fundación Universitaria del Área Andina. Valledupar, Colombia Fundación Universitaria del Área Andina. Valledupar, Colombia.
Correo electrónico: lquintero34@areandina.edu.co; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3498-3469>
- f Magíster en Geología económica. Docente de la Fundación Universitaria del Área Andina, Bogotá, Colombia. Fundación Universitaria del Área Andina. Valledupar, Colombia.
Correo electrónico: eliaser@hotmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0402-1565>
- g Magíster en Geología de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú. Fundación Universitaria del Área Andina. Valledupar, Colombia.
Correo electrónico: frank.lascarro@unmsm.edu.pe; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9433-2863>
- h Magíster en Ingeniería y Tecnología Ambiental y Magíster en Gestión Ambiental y Energética en las Organizaciones. Docente de la Universidad de La Guajira, Riohacha, Colombia. Universidad de La Guajira. Riohacha, Colombia.
Correo electrónico: dcmancoj@uniguajira.edu.co; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8506-094X>

Resumen: En este manuscrito se presenta el análisis de una amenaza por remoción de laderas mediante técnicas determinísticas y heurísticas a escala 1:5000, entre los km 21 a 23 de la vía Zanjón-Pueblo Bello, identificándose las unidades geológicas predominantes, analizadas geotécnicamente y determinándose los elementos geomorfológicos, complementados con estudios geofísicos con tomografías eléctrica de resistividad (TER), para obtener información de los diferentes tipos de suelos a profundidad por medio de datos de resistividad y búsqueda del nivel freático. Los materiales expuestos en las laderas por lo general son arena fina a gruesa (A-3) compuesta mineralógicamente de cuarzo y pequeñas cantidades de arcilla de tipo caolín, atribuidas a la alteración de los feldespatos de la facies cuarzomonzonita del Batolito de Pueblo Bello, que geotécnicamente exhibe una baja o nula plasticidad, favoreciendo la filtración de agua, la presión de poros y la poca resistencia al corte. Al incorporar los factores condicionantes y desencadenantes se obtuvo el mapa de amenaza por remoción en masa con predominios del 15 % del área con un grado de amenaza muy alta, un 60 % con grado alto, un 15 % con grado medio, un 5 % que cubren zonas con grado bajo y otro 5 % con grado muy bajo. Esto confirma que las fuertes pendientes de las laderas y la presencia de arcilla en el material causa principalmente una amenaza de alto grado, por su respuesta ante el contacto con el agua, generando desequilibrios, a tal punto de producir deslizamientos que afectarán a las comunidades allí asentadas.

Palabras clave: amenaza; deslizamiento; tomografía eléctrica de resistividad; Zanjón

Recibido: 03/07/2024 **Aceptado:** 18/09/2024 **Disponible en línea:** 11/04/2025

Cómo citar: Martínez López , A. C., Moscote Bracho , M. L., Moscote Bracho, R. E., Tapia Vela, L. C., Quintero López, L. A., Rojas Martínez , E. E., ... Manco Jaraba, D. C. (2025). Caracterización geofísica y zonificación de amenaza por remoción en las laderas ubicadas en el tramo km 21 a km 23 de la Vía Zanjón – Pueblo Bello, Cesar. Ciencia E Ingeniería Neogranadina, 35(1), 47–69. <https://doi.org/10.18359/rcin.7467>

Geophysical Characterization and Hazard Zoning for Mass Wasting on the Slopes Between km 21 and 23 of the Zanjón-Pueblo Bello Road, Cesar

Abstract: This manuscript presents a slope landslide hazard analysis using deterministic and heuristic techniques at a 1:5000 scale in the section between Km 21 and Km 23 of the Zanjón-Pueblo Bello road. The study identifies the predominant geological units, analyzes their geotechnical properties, and determines the relevant geomorphological elements. These analyses are complemented by geophysical studies using Electrical Resistivity Tomography (ERT) to obtain subsurface information on different soil types through resistivity data and to locate the water table. The exposed slope materials primarily consist of fine to coarse sand (A-3), mineralogically composed of quartz with small amounts of kaolin-type clay. This clay is attributed to the alteration of feldspars within the quartz monzonite facies of the Pueblo Bello Batholith. Geotechnically, these materials exhibit low or no plasticity, facilitating water infiltration, increasing pore pressure, and reducing shear strength. Considering these conditioning and triggering factors, a mass-wasting hazard map was generated. The results indicate that 15% of the area presents a very high hazard, 60% a high hazard, 15% a medium hazard, 5% a low hazard, and 5% a very low hazard. These findings confirm that the steep slopes and the presence of clay significantly contribute to the high hazard level, as their interaction with water leads to instability and potential landslides, which pose a threat to the communities in the region.

Keywords: Threat; Slippage; Electrical Resistivity Tomography; Zanjón

Caracterização geofísica e zoneamento da ameaça por movimentação de massa nas encostas entre os km 21 e 23 da rodovia Zanjón-Pueblo Bello, Cesar

Resumo: Este manuscrito apresenta a análise da ameaça por movimentação de encostas por meio de técnicas determinísticas e heurísticas na escala 1:5000, entre os km 21 e 23 da rodovia Zanjón-Pueblo Bello. Foram identificadas as unidades geológicas predominantes, analisadas geotecnicamente e determinados os elementos geomorfológicos, complementados por estudos geofísicos utilizando tomografias elétricas de resistividade (TER), para obter informações sobre diferentes tipos de solos em profundidade, com base em dados de resistividade e na localização do nível freático. Os materiais expostos nas encostas são predominantemente areia fina a grossa (A-3), compostos mineralologicamente por quartzo e pequenas quantidades de argila do tipo caulinita, resultante da alteração de feldspatos da facies quartzomonzonítica do Batólito de Pueblo Bello. Do ponto de vista geotécnico, esse material apresenta baixa ou nenhuma plasticidade, favorecendo a infiltração de água, o aumento da pressão de poros e a baixa resistência ao cisalhamento. Ao considerar os fatores condicionantes e desencadeantes, foi gerado um mapa de ameaça por movimentação de massa, indicando que 15% da área apresenta grau de ameaça muito alto, 60% grau alto, 15% grau médio, 5% grau baixo e 5% grau muito baixo. Esses resultados confirmam que a forte inclinação das encostas e a presença de argila no material aumentam significativamente o risco, pois o contato com a água gera instabilidade, podendo resultar em deslizamentos que impactam as comunidades locais.

Palavras-chave: ameaça; deslizamento; tomografia elétrica de resistividade; Zanjón

Introducción

Los movimientos de laderas pueden considerarse como los reajustes del terreno para conseguir el equilibrio ante un cambio de condiciones; estos procesos llegan a concebir riesgos geológicos potenciales, ya que pueden causar daños económicos y sociales al afectar actividades, construcciones y vidas humanas [1]. Además, establecen condiciones de riesgos geológicos trascendentales que afectan el progreso estable de una comunidad y por ende de un país; se conciben a raíz de cambios continuos en las propiedades de las unidades rocosas, siendo sus fuentes eventos naturales (climáticos y sísmicos) o acciones antrópicas desmedidas. Es por esto que dentro de la administración legal del Estado colombiano se establece en el Decreto 1807 de 2014 [2], [3], que la delimitación y zonificación de áreas con condiciones de amenaza es uno de los estudios técnicos esenciales para integrar la gestión del riesgo en el Plan de Ordenamiento Territorial (POT), asegurando una planificación de avance seguro y una gestión ambiental sostenible, permitiendo la concepción y aplicación de técnicas en todo el territorio, a diferentes escalas, que proporcionan resultados significativos.

Tener el conocimiento del grado de amenaza por movimientos de remoción en masa del área en estudio es relevante para el departamento del Cesar [4], [5], porque proporciona información exigida por la normatividad aplicable a la gestión del riesgo de desastres, la Ley 388 de 1997 [6]. Se requiere que todos los municipios elaboren planes de ordenamiento territorial, en los que consideren la zonificación de amenazas y riesgos, y la colaboración en la implementación de medidas de prevención, recuperación y conservación.

En la zona estudiada, las unidades expuestas son: el Batolito de Pueblo Bello en su facies cuarzomonzonita y las ignimbritas de Los Clavos, que

exponen una topografía montañosa con inclinaciones elevadas, donde se encuentran espacios transitados y habitados que pueden ser afectados por eventos de inestabilidad causantes de pérdidas económicas, sociales y humanas. Con respecto a lo anterior, según la necesidad latente, esta investigación consigna un análisis de amenaza por remoción en masa de los taludes y laderas ubicadas en el tramo de los km 21 a 23 de la vía Zanjón-Pueblo Bello, Cesar; especifica en detalle los factores condicionantes (cartografía básica, geología, UGI, geomorfología, cobertura vegetal y uso del suelo) y los detonantes (precipitación y sismicidad), además de las caracterizaciones geotécnicas y la implementación de técnicas geofísicas, tal como la tomografía eléctrica de resistividad (TER), con el fin de generar un mapa de amenaza a escala 1:5000.

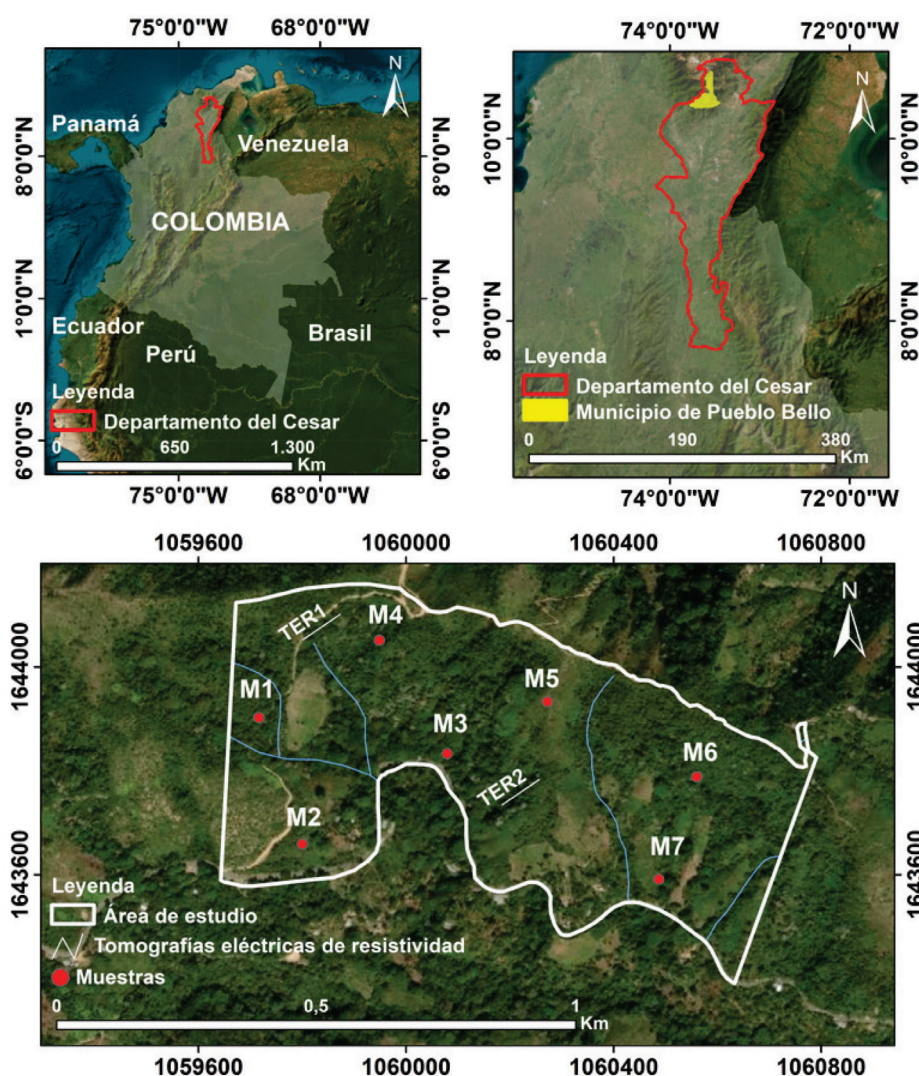
Localización

El trayecto de estudio se localiza en el departamento del Cesar, en el tramo Zanjón-Pueblo Bello, exactamente en el km 21+700 a km 23+200 (figura 1), estribaciones sur de la Sierra Nevada de Santa Marta (SNSM).

Metodología

Se realizó inicialmente una revisión exhaustiva del estado del arte mediante el análisis de diversas bases de datos académicas y científicas. Posteriormente, fases de campo para reconocimiento, dos tomografías eléctricas de resistividad (TER), toma de siete muestras y de datos. Para la generación del mapa de amenaza por remoción en masa de las laderas del tramo que va del km 21 al 23 de la vía Zanjón-Pueblo Bello, se empleó la *Guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa*, versión 2016, realizada por el Servicio Geológico Colombiano [3].

Figura 1. Localización del área de estudio



Fuente: elaboración propia.

Se exponen los procedimientos que, considerando el estado actual del conocimiento y las capacidades técnicas y económicas del país, son adecuados para la realización de estudios detallados sobre amenaza, vulnerabilidad y riesgo, alineándose con la normativa establecida en el Decreto 1807 de 2014, del Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible [2], a escalas de 1:5000 y 1:2000 [3]. Para lograr los estudios de amenaza a escala de 1:5000, según la Guía del sgc [3], se tuvieron en cuenta los siguientes insumos: cartografía básica a la escala de 1:5000, modelo digital de terreno (DEM) con elevaciones del área

de estudio y registros de precipitación y sismos; estos permitieron obtener los factores condicionantes, como las unidades de geología para ingeniería (UGI), el mapa geomorfológico por medio de los elementos geomorfológicos, la exploración del suelo mediante muestreo inalterado, los ensayos de laboratorio (granulometría, límite de consistencia, humedad, peso específico, cohesión y ángulo de fricción de las muestras), los apiques y el subsuelo por medio de estudios geofísicos (dos TER), y el inventario de movimientos en masa observados en el trabajo de campo, permitiendo identificar características de eventos, distribución espacial,

temporal y relación con los factores detonantes [3]; mediante formatos anexados por la Guía y Corine Land Cover-adaptada Ideam [7]-[9] se adquirió digitalmente la cobertura y uso del suelo del área a estudiar.

Con base en los factores descritos se estableció un modelo geológico-geotécnico que requiere una exploración geotécnica básica. Esta exploración permite caracterizar geomecánicamente los materiales del subsuelo y aplicar el método determinístico de estabilidad. Para taludes en suelos se

utiliza un modelo de talud infinito, mientras que para taludes en roca se emplean modelos convencionales de estabilidad de macizos rocosos, como la técnica SMR [10].

Se realizó la modelación y el cálculo de amenaza, adicionando los factores detonantes, es decir, nivel freático y aceleración sísmica. Una vez estuvo lista el área de estudios zonificada geológica-geotécnicamente y el factor de seguridad (FS), se clasificó según los rangos estipulados en la Guía del SGC 2016 [3] (figura 2).

Figura 2. Rangos de zonificación de amenaza según el factor de seguridad y SMR

$FS > 1,5$	$1,1 < FS < 1,5$	$FS < 1,1$
$SMR > 60$	$41 < SMR < 60$	$SMR < 40$
AMENAZA BAJA	AMENAZA MEDIA	AMENAZA ALTA

Fuente: [3].

Además se empleó el método heurístico para la realización del mapa de amenaza por remoción en masa, que determina el índice de susceptibilidad de movimientos en masa (ISM) con el uso del sistema de información geográfica (SIG) [11], es decir, a cada mapa, correspondiente a los insumos, factores condicionantes y detonantes, se le asignó un peso o calificación que va entre 1-5 (muy baja, baja, media, alta y muy alta, respectivamente), según las propiedades del mapa, teniendo como resultado cada uno su respectivo mapa de susceptibilidad; después se da el proceso jerárquico analítico, que consiste en rasterizar porcentualmente, teniendo en cuenta la importancia del mapa; finalmente, mediante la rasterización de todos los mapas se obtiene el mapa de amenaza.

Dependiendo de los resultados obtenidos, se procederá de inmediato en las zonas de alta amenaza que contengan elementos expuestos, áreas urbanizadas ocupadas o edificadas, edificaciones indispensables y líneas vitales. Estas áreas, consideradas en condición de riesgo, se priorizarán para realizar estudios detallados a escala 1:2000 [3]. Mientras que las zonas desocupadas categorizadas con amenaza media y alta, clasificadas como suelo urbano, de expansión urbana o centro poblado rural, se consideran en condición de

amenaza y deben ser evaluadas en estudios detallados [3]. Al final, a las zonas con amenaza baja se les darán recomendaciones de mitigación no estructurales.

Por último, para la creación del mapa de amenaza por remoción en masa, se realiza una rasterización, que consiste en hacer una sumatoria de todos los mapas reclasificados/rasterizados, según el grado de susceptibilidad y multiplicados por la importancia porcentual, con la herramienta Raster Calculator en el *software* ArcMap 10.3. Los porcentajes son distribuidos (figura 3) y finalmente se genera el objetivo general propuesto.

Resultados

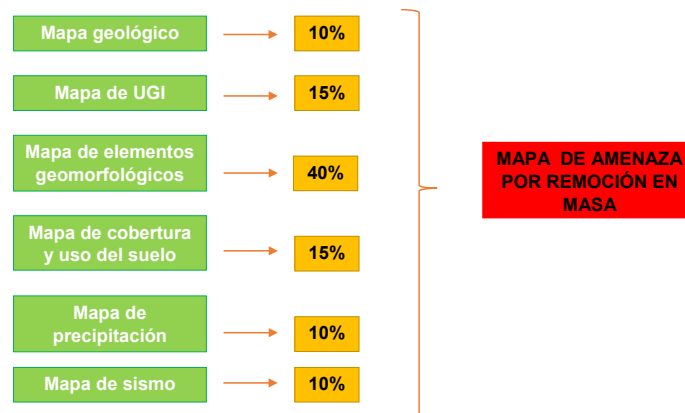
Geología

Por medio del levantamiento cartográfico y muestreo se determinó que la zona analizada está compuesta en su mayoría por suelo orgánico y residual de la Unidad Batolito de Pueblo Bello (figura 4a y 4b), producto de la meteorización de rocas ígneas; según [12]-[15], la unidad se divide en tres facies: facies cuarzomonzonita (Jcm), conformada por rocas intrusivas rosáceas de grano grueso a medio; facies granito (Jg), correspondiente a un granito

leucocrático de grano grueso, con alto contenido en cuarzo, y la facies granito granofírico (Jgr), que agrupa cuerpos intrusivos pequeños, irregulares, cortados por diques leucocráticos de grano fino.

En los puntos evaluados se encontró material de suelo residual o roca altamente meteorizada; en la estación AMR-007 (figura 4c) se observa la textura de la roca original, es decir, material parental del Batolito de Pueblo Bello.

Figura 3. Distribución porcentual de cada mapa de susceptibilidad para la creación del mapa de amenaza por remoción en masa



Fuente: elaboración propia con información de [3].

Figura 4. Extracción de muestras, a: perfil de suelo compuesto por materia orgánica, b: perfil compuesto por suelo residual del Batolito de Pueblo Bello, y c: perfil de meteorización



Fuente: elaboración propia.

El material que se encuentra en las laderas del tramo entre el km 21 y 23 de la vía Zanjón-Pueblo Bello pertenece a la facies plutónica, cuarzo-monzonita del Batolito de Pueblo Bello (Jcm), y ocupa en la zona de estudio un área de 45 hectáreas (figura 5); [12]-[14] la describen macroscópicamente como rocas intrusivas ígneas, texturalmente holocristalina, hipidiomórfica, con grano grueso a medio, grises claras a rosado, con presencia de anfíboles y biotita, composicionalmente corresponden a monzogranitos, granitos y cuarzomonzonitas.

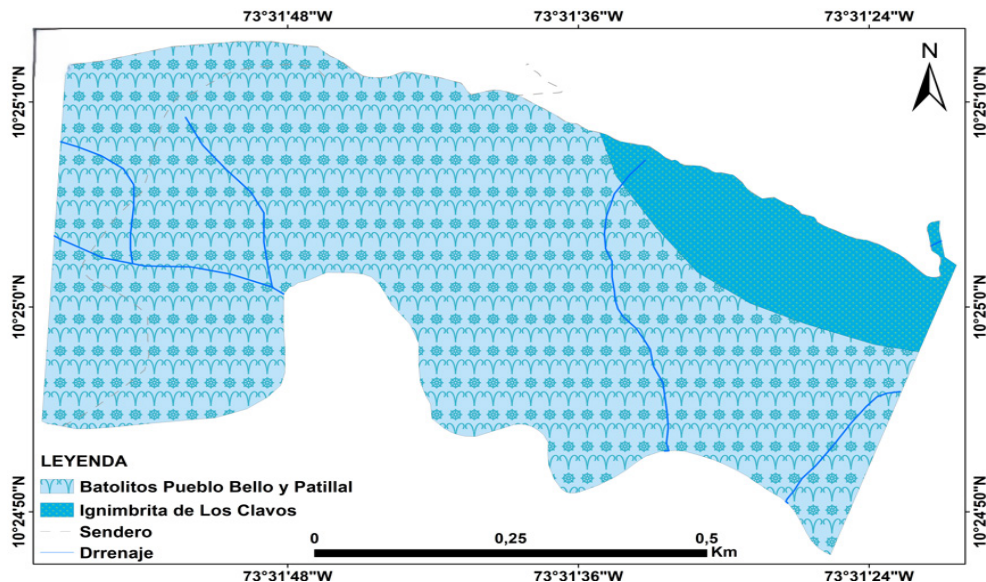
Las ignimbritas de Los Clavos (Jlc) tienen una menor proporción (cinco hectáreas; figura 5), no contemplándose mesoscópicamente en el trabajo de campo, por su alta complejidad de acceso. Se describe como una sucesión vulcanoclástica de cristalinas a líticas, de composición andesítica, con textura porfiroclástica de meso a fino granular, y con matriz que varía del 20 % al 80 % vítrea,

afanítica, con tonalidades verdosas, grises y negras, con clastos de tamaño de lapilli a bloques [12], [13].

En áreas contiguas, puntualmente en los km 16 al 18, exterioriza características generales, como tonalidad gris amarilloso claro, moderado grado de fracturamiento con direcciones preferenciales al sw, con texturas rugosas y dureza alta clasificada como roca dura; identificada texturalmente como ignimbrita, de acuerdo con la clasificación de rocas piroclásticas de [16]. Presenta concentraciones de hornblenda, biotita, piroxenos, cuarzo feldespatos potásicos plagioclasas y fragmentos líticos, con una textura afanítica y cristales de tamaños medio oscilando entre los 2 mm [17].

A la facies cuarzomonzonita se le da una calificación baja (2) y está distribuida en un 90 % al norte, noroeste, suroeste y sureste del área de estudio; a las ignimbritas de Los Clavos se les proporciona una calificación media (3), distribuidas un 10 % al noreste del área.

Figura 5. Mapa geológico



Fuente: elaboración propia.

Unidades geológicas para ingeniería (UGI)

En el área de estudio se identificaron tres tipos de suelos, correspondientes a suelo antrópico y suelos residuales (figura 6):

Suelo antrópico (Sa): presenta un espesor de 30 centímetros (figura 6) a dos metros (figura 6), suprayaciendo al suelo residual del batolito de Pueblo Bello, con una textura matriz soportada, húmeda, con permeabilidad media, gran contenido de materia orgánica y arcilla, plástica, de

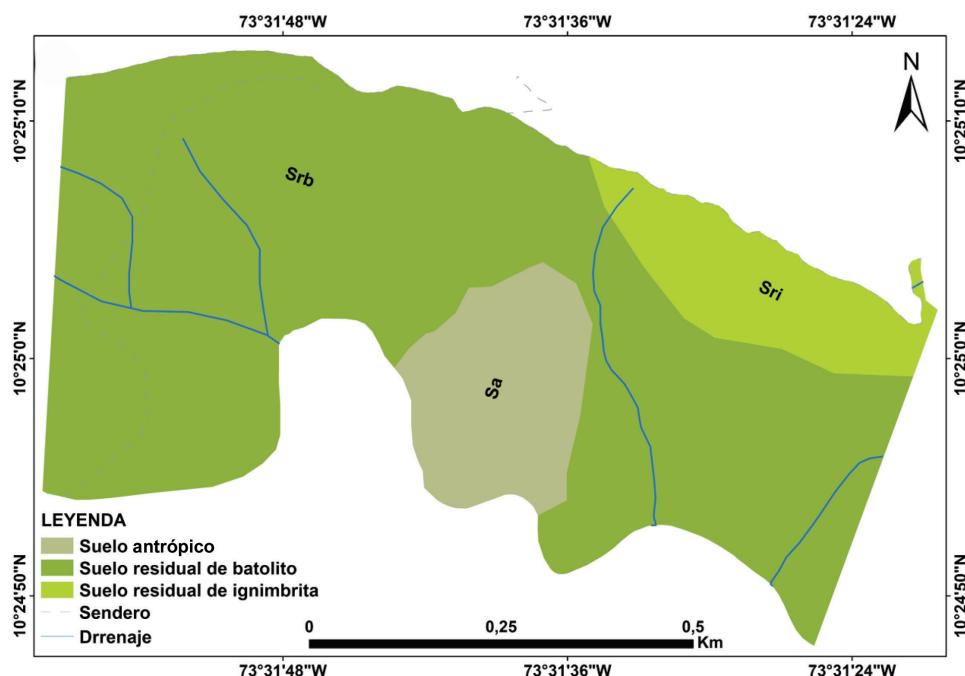
color marrón moderado, muy blanda y con una densidad muy suelta.

Suelo residual o roca altamente meteorizada (Srb): presenta un espesor de 70 centímetros a cuatro metros, proveniente de la facies cuarzo-monzonita del Batolito de Pueblo Bello, muestra en algunos sectores la estructura de la roca madre, pero es muy endeble al contacto con las manos o el martillo, de textura matriz soportada, seca, con una permeabilidad media, cárcavas de 1-10 cm de profundidad, con gran contenido de arena fina y limo, no es plástica, de color naranja amarillento pálido, una resistencia blanda y una densidad muy suelta.

Suelo residual proveniente de las ignimbritas de Los Clavos (Sri): con textura matriz soportada, húmeda, con una permeabilidad alta, con gran contenido de arena fina y una matriz arcillosa, poco plástica, de color pardo, una resistencia blanda y una densidad muy suelta.

A los suelos antrópicos (Sa) se le da una calificación baja (2), encontrándose distribuidos un 10 % al sur del área de estudio; a los suelos residuales del Batolito de Pueblo Bello se le proporciona una calificación alta (4), esparcidos un 80 % al norte, noroeste, suroeste y sureste en la zona; y a los suelos residuales de las ignimbritas de Los Clavos se les otorga una calificación media (3), distribuidas un 10 % al noreste del área (figura 6).

Figura 6. Mapa de Unidades Geológicas para Ingeniería



Fuente: elaboración propia.

Geomorfología

Geomorfológicamente se consideraron varios aspectos, como las pendientes, morfometría, geoformas, morfogénesis y morfodinámica. Las pendientes muestran que en los relieves que se encuentran al norte y sur de la zona evaluada predominan mayormente inclinaciones de 0 %-34 %, y en casi

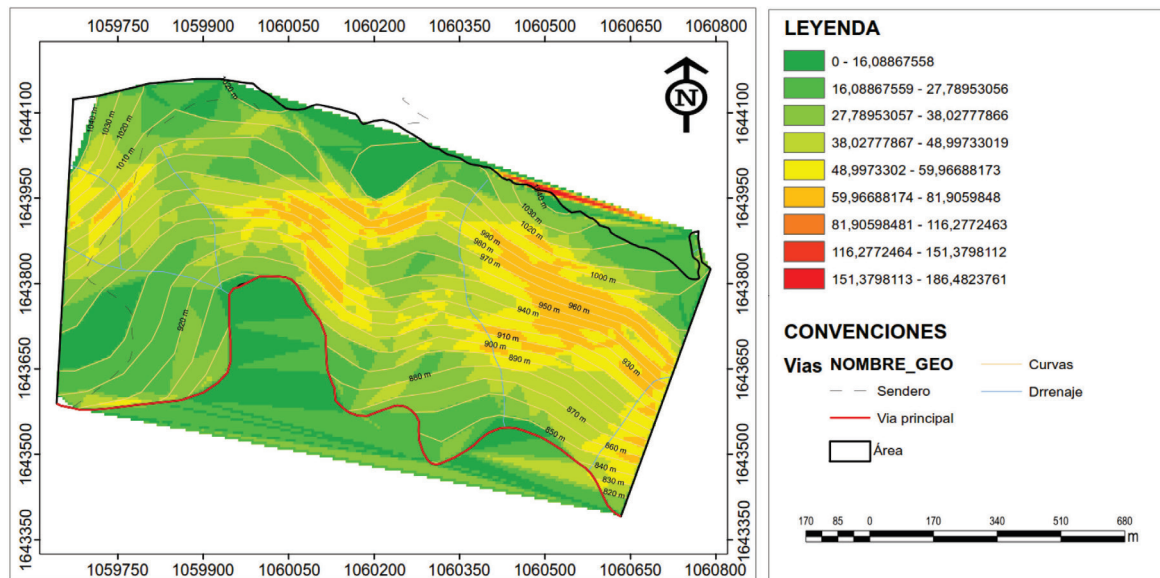
igual proporción, pero en el centro del área, hay inclinaciones de 35 %-96 %, y al noreste se logran ver inclinaciones de entre 97 %-186 % (figura 7).

Morfométricamente predominan en su mayoría inclinaciones de 21 %-55 %, con un relieve colinado fuertemente disectado/empinado; después, con una menor proporción de pendientes

de 14 %-20 %, un relieve colinado redondeado/moderadamente empinado; luego, inclinaciones 8 %-13 %, con un relieve ondulado redondeado/inclinado, y en menor proporción, inclinaciones entre 3 %-7 % y 0 %-2 %, con un relieve ondulado/suavemente inclinado y plano o casi plano, respectivamente (figura 8).

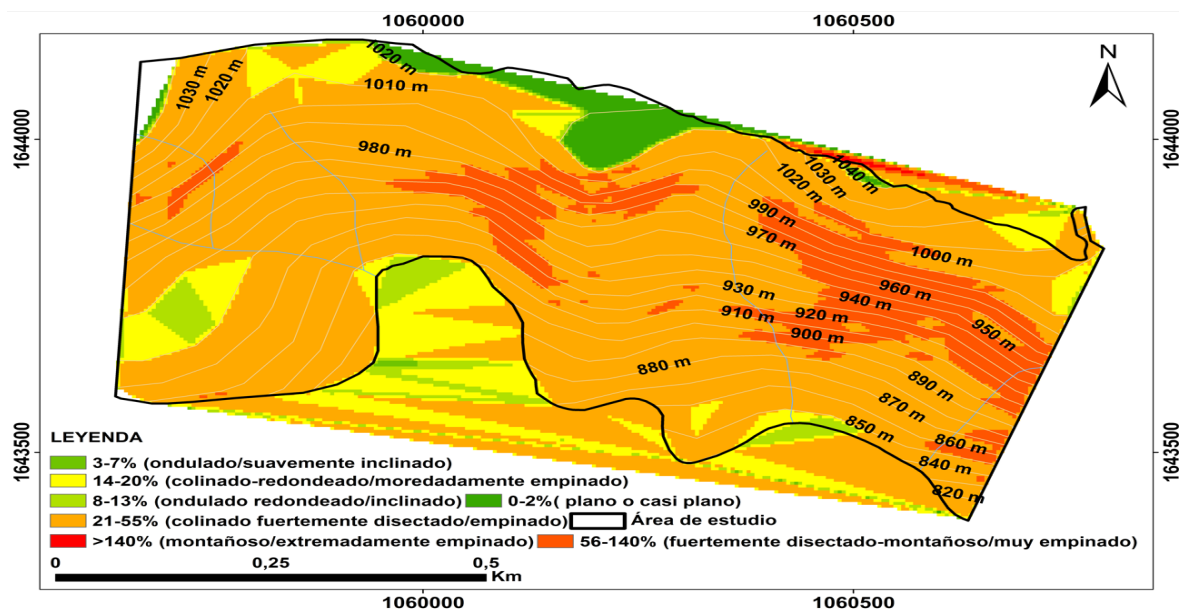
En lo que respecta a la morfodinámica, está formada por laderas con pendientes significativas, destacándose un entorno denudativo (figura 9) debido a la acción de procesos erosivos pluviales e hídricos, como resultado de la erosión, meteorización y desplazamiento de materiales sobre las preexistentes geoformas [18].

Figura 7. Mapa de pendientes

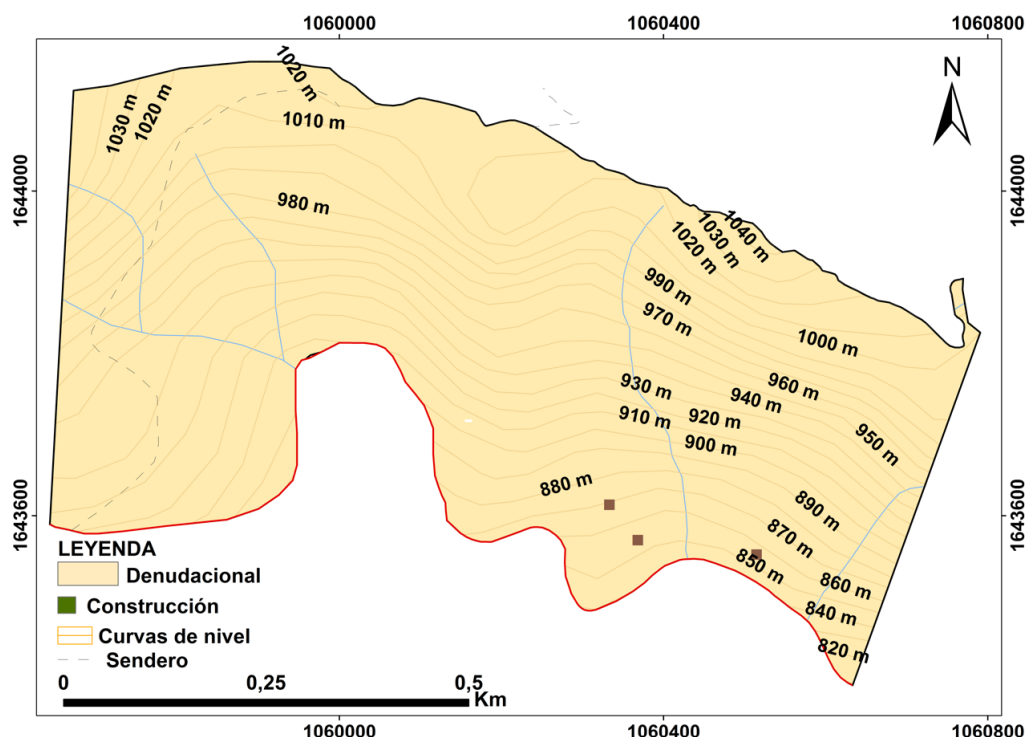


Fuente: elaboración propia.

Figura 8. Mapa morfométrico



Fuente: elaboración propia.

Figura 9. Mapa morfodinámico

Fuente: elaboración propia.

Las geoformas identificadas corresponden a deslizamientos menores activos, lomo denudado, ladera erosiva y lomo residual, descritos a continuación:

Deslizamientos menores activos (Ddma): se encontraron deslizamientos de detritos recientes, observados en campo, que tienen un ancho de 1,75-6,12 metros, encontrados en los taludes cuasiverticales de la vía principal, provenientes de la facies cuarzomonzonita de Batolito de Pueblo Bello (figura 10).

Lomo denudado (Dld): sistema de lomos que se encuentran a diferentes alturas y se caracterizan por presentar un índice de relieve bajo, con ejes que varían entre 1100 y 1300 m de longitud. Los topos de los lomos son agudos, debido a que se encuentran moderadamente incisados y se desarrollan sobre las cuarzomonzonitas moderadas a altamente meteorizadas del Batolito de Pueblo Bello (figura 10).

Ladera erosiva (Dlo): superficie en declive, de longitud muy larga, con índice de relieve moderado, de escarpadas a inclinadas pendientes, y

forma convexa en la parte alta media, y plana en la base de la ladera. Se caracteriza por un drenaje subdendrítico a subparalelo denso que se desarrolla sobre suelo residual asociado al Batolito de Pueblo Bello, y es común que presente procesos erosivos (figura 10).

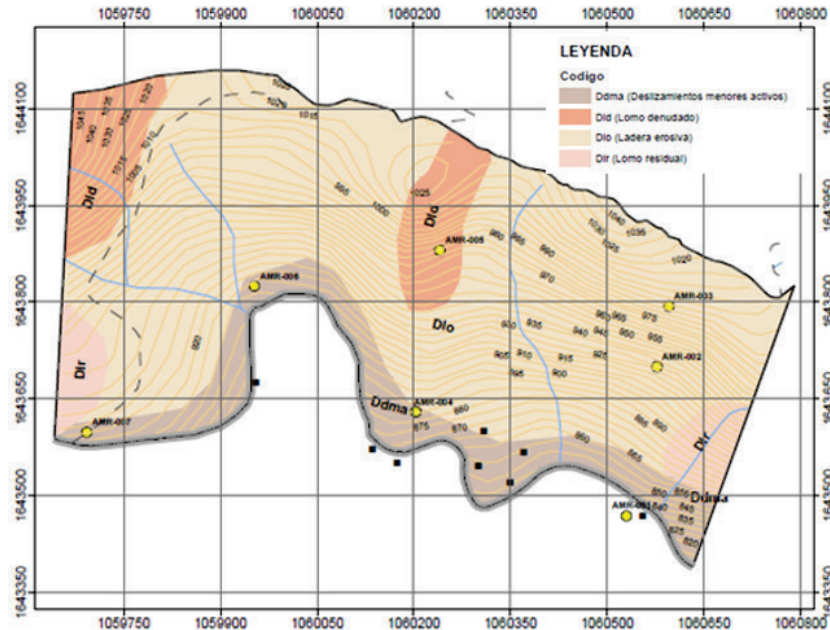
Lomo residual (Dlr): elevación del terreno con un índice de relieve relativo, bajo, desarrollada sobre la facies cuarzomonzonita, debido a procesos de meteorización diferencial. Se distingue por su morfología alomada y elongada, con laderas cortas de forma convexa y pendientes que van desde inclinadas hasta escarpadas (figura 10).

Se les otorga a los deslizamientos menores activos (Ddma), distribuidos en un 30 % en el área de estudio, una calificación alta (4); a los lomos denudados (Dld), que están presentes en un 20 %, se les da una calificación media (3); a las laderas erosivas (Dlo), distribuyéndose en un 40 %, se les califican como bajas (2), y a los lomos residuales (Dlr), que se encuentran en un 10 % del área de estudio, se les da una clasificación muy baja (1).

En la figura 11 se muestra la calificación de susceptibilidad a procesos geomorfológicos. Se muestra una calificación alta (4), distribuida en un 40 % al oeste, centro, noreste y sureste, en toda el área de estudio; una calificación muy alta (5), dispersa en un

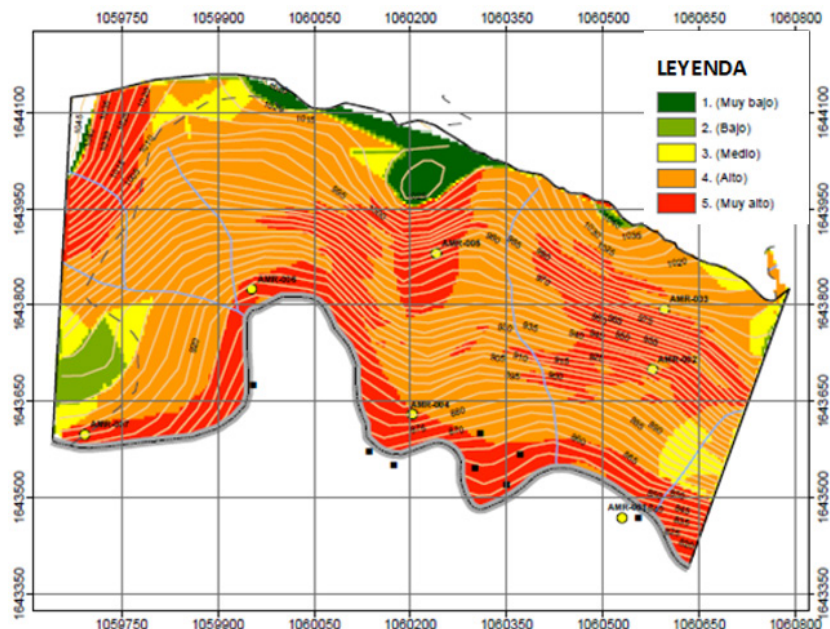
30 % al noroeste, centro, suroeste, sur, este y sureste en la zona; una calificación media (3), esparcida en un 20 % en el área, y unas calificaciones de baja (2) y muy baja (1), extendidas en un 5 % al suroeste y norte, respectivamente, de la zona de estudio.

Figura 10. Mapa morfogenético



Fuente: elaboración propia.

Figura 11. Reclasificación de elementos geomorfológicos



Fuente: elaboración propia.

Inventario de movimientos en masa

La figura 12 muestra que el tramo de la vía que del Zanjón conduce a Pueblo Bello exhibe deslizamientos a pequeña escala con edades menores a un año, los cuales se encuentran activos con movimiento de flujo de detritos provenientes de los suelos residuales de las cuarzomonzonitas del Batolito de Pueblo Bello.

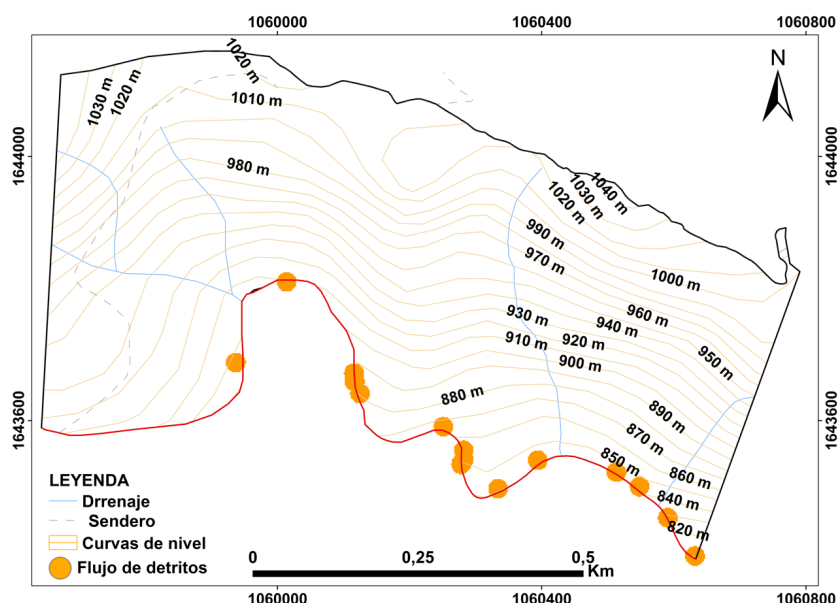
Cobertura y uso del suelo

La información otorgada por Corine Land Cover muestra que en el área de estudio están

distribuidos los pastos limpios en un 60 %, representados por el color verde, y en las zonas amarillas se encuentra esparcidos en un 40 % los mosaicos de cultivos, pastos y espacios naturales (figura 13).

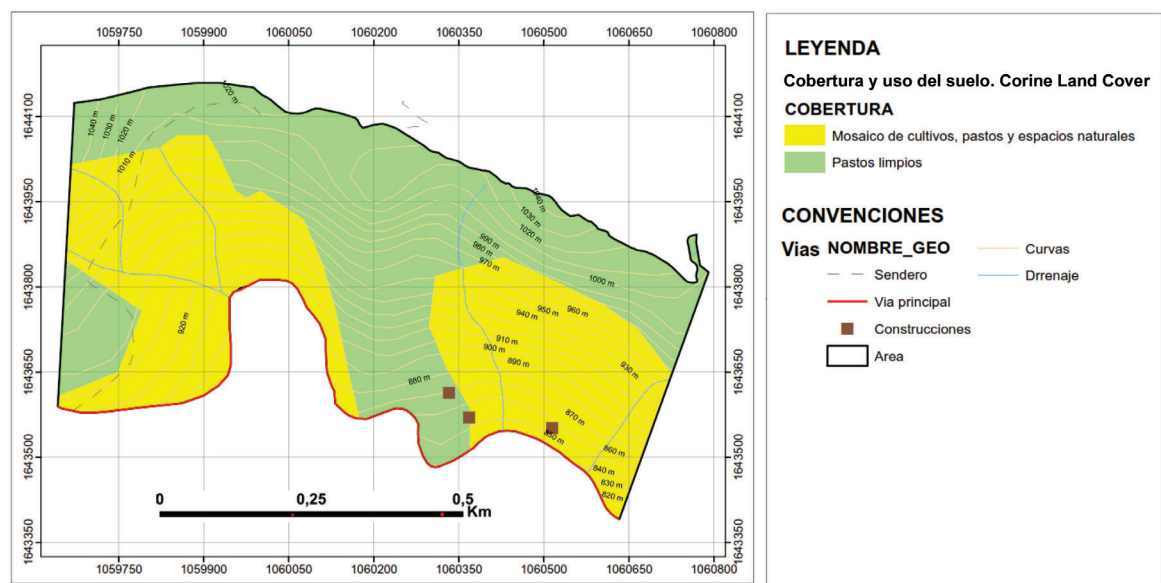
Se reclasifica a cada tipo de cobertura vegetal, según el grado de susceptibilidad a movimiento en masa, y se le da una calificación media (3) a los mosaicos, pastos y espacios naturales de cultivos, los cuales se encuentran distribuidos en un 40 % en el área, y a los pastos limpios se les da una calificación baja (2).

Figura 12. Mapa de inventario de movimientos expuestos



Fuente: elaboración propia.

Figura 13. Mapa de cobertura y uso del suelo



Fuente: elaboración propia.

Modelo geológico-geotécnico

Mediante ensayos de laboratorios se obtuvieron los

resultados de granulometría, límite de consistencia, humedad, peso específico, cohesión y ángulo de fricción de las muestras obtenidas (tabla 1).

Tabla 1. Resultados de laboratorios de la zona que abarca el trayecto del tramo entre los km 21 y 23 de la vía Zanjón-Pueblo Bello

Muestra	Ubicación	Profundidad (m)	Capa	Espesor (m)	Clasificación		Granulometría			Límite de consistencia			Wn (%)	γ (gr/cm3)	Cohesión	Φ
					USGS	AASHTO	% Gravas	% Arenas	% Pasa T200	LL	LP	IP				
AMR-001	K21	0 - 1	2	1	SC	A-6	82,4	25,3	0,89	39	37,57	1,43	21	1,71	42	13,7
AMR-005	K21 + 500	0 - 0,8	2	0,8	-	A-3	89,7	25,6	0,35	NL	NL	-	13	1,4	-	-
AMR-006	K22	0 - 0,8	2	0,8	-	A-3	62,8	15,9	1,59	NL	NL	-	12	2	30	22,6
AMR-007	K23	0 - 0,8	2	0,8	-	A-3	63,5	16,5	1,37	NL	NL	-	13	1,6	-	-
AMR-004	K21 + 500	0,1 - 1,5	2	1,4	ML	A-7-6	6,0	37,0	57	43	27	16	15	-	30	1,25
AMR-002	K21 + 500	0,1 - 1,4	2	0,8	SC	A-6	8,0	48,0	44	38	23	15	11	-	-	-
AMR-003	K21 + 500	0,1 - 1,5	2	0,8	SC	A-6	27,0	34,0	39	40	21	19	22	-	-	-

Fuente: elaboración propia.

El área se delimita según el grado de homogeneidad geotécnica que presenta con respecto a las propiedades obtenidas mediante los ensayos de laboratorio. De esta manera se obtiene el mapa geológico-geotécnico (figura 14).

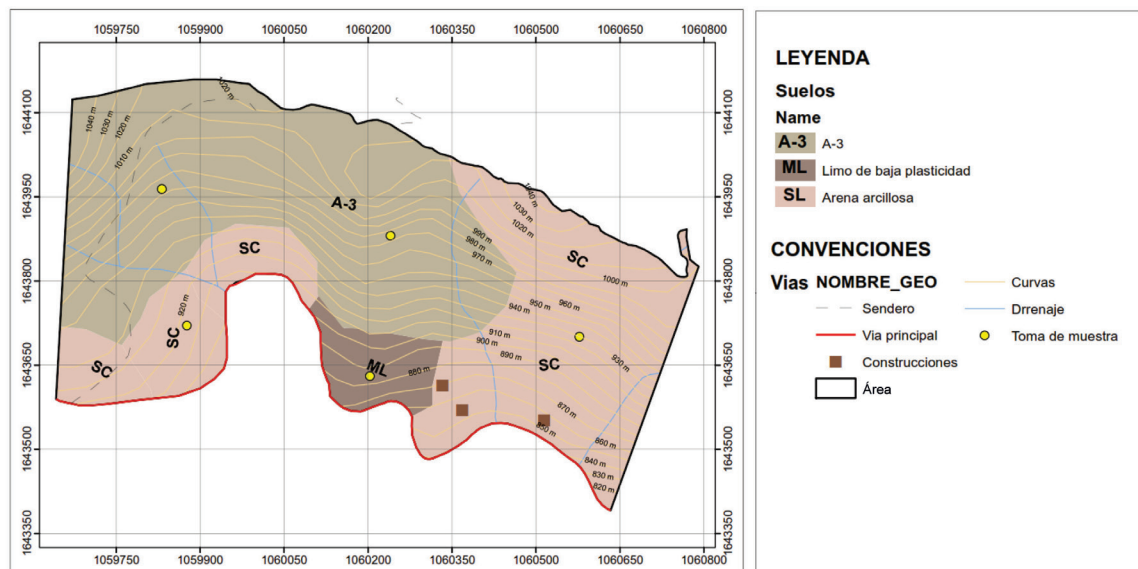
Tomografía eléctrica de resistividad (TER)

Se realizaron dos tomografías eléctricas de resistividad (TER 1 y TER 2). En la TER 1 se identificaron dos capas, con valores que van de 600 a 2000 ohm.m, correspondientes a las arenas medias a gruesas secas, y datos de 2500 a 5500 ohm.m,

propios de gravas gruesas (figura 15a). Sus elevaciones van de los 986 a los 996 msnm, en los cuales no se puede observar suelo o roca saturada.

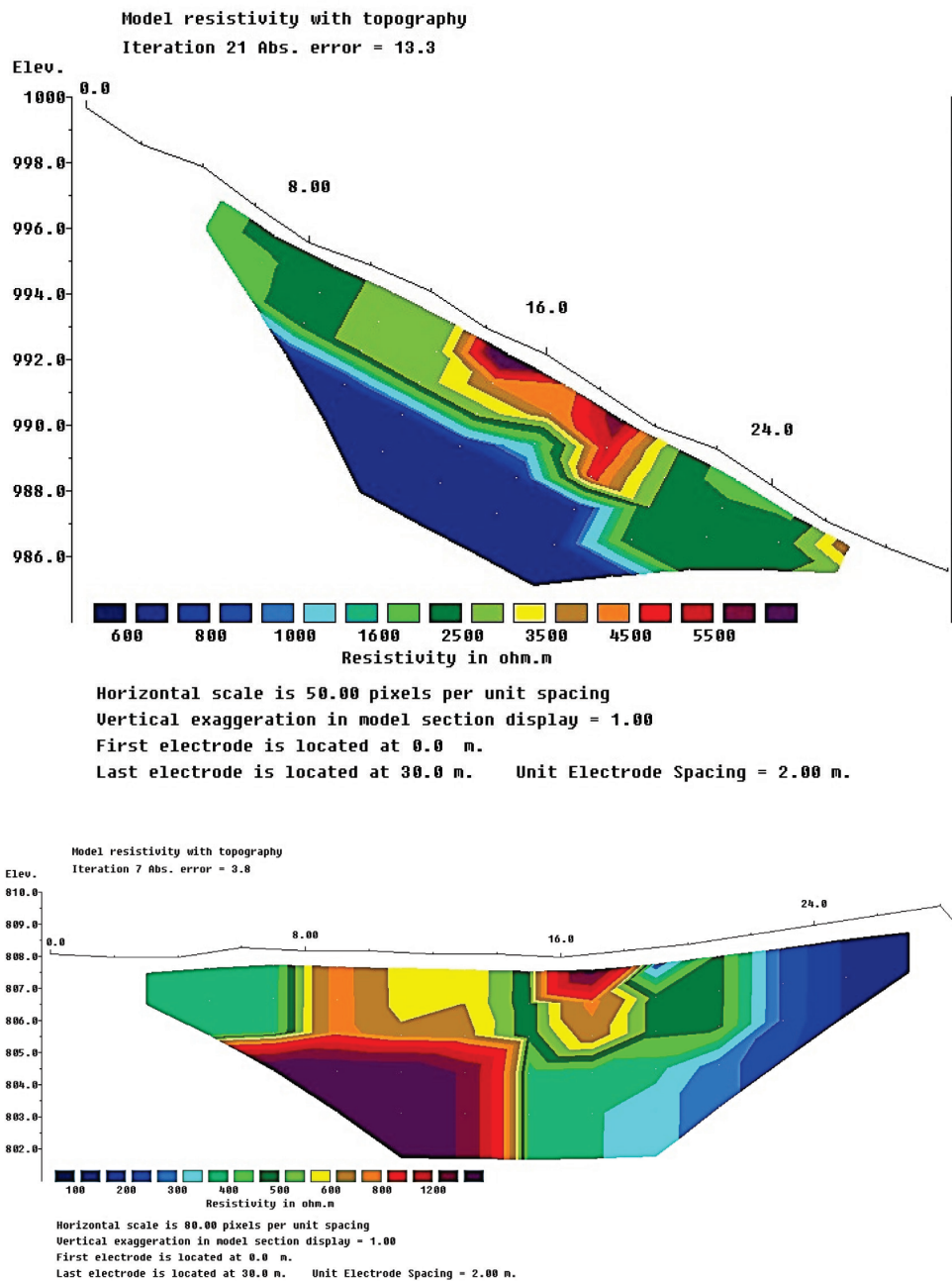
En la TER 2 se muestran valores de resistividad que oscilan entre los 100 a 300 ohm.m, correspondientes a arenas medias gruesas con gravas saturadas; datos de 400 a 600 ohm.m, que corresponden a arenas secas, y datos de 600 a 1200 ohm.m, concernientes a arenas medias a gruesa seca. Esta línea exhibe datos de elevación que van de los 802 a los 808 msnm, donde se identifica la roca saturada y se puede estimar el nivel freático de la zona de estudio, estableciéndose a cuatro metros de profundidad (figura 15B).

Figura 14. Mapa geológico-geotécnico



Fuente: elaboración propia.

Figura 15. a) gráfica de elevación vs. resistividad de la TER 1; b) gráfica de elevación vs. resistividad de la TER 2



Fuente: elaboración propia.

Factores detonantes

Precipitación

Los registros mensuales multianuales de precipitación del 2010 al 2018 (tabla 2) publican la

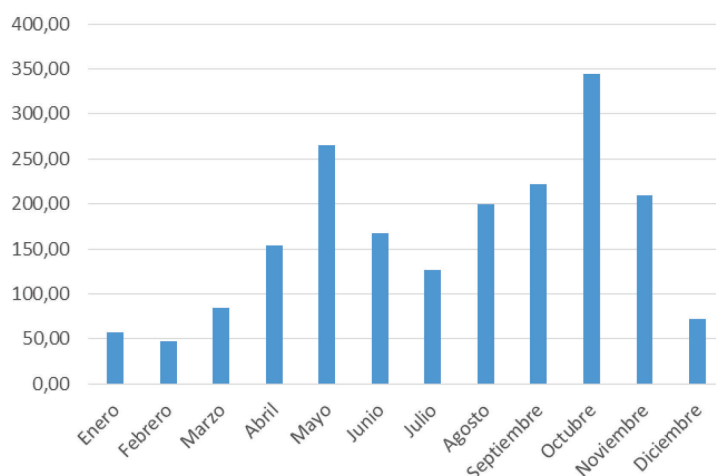
precipitación total mensual en ciclo bimodal con picos en los meses de mayo y octubre. Se observan valores bajos en enero y febrero, siendo febrero el menos lluvioso, con 47,78 mm aprox. Crece linealmente hasta alcanzar 265,8 mm en mayo, descendiendo a 126,08 en julio y sube de nuevo a los

345,04 mm en octubre, hasta descender otra vez de diciembre a enero. La diferencia de la precipitación es considerable en los periodos referidos y se instituye un trimestre seco, correspondiente a los meses de diciembre y febrero; se categorizan los faltantes en periodos lluviosos, dentro de los cuales

se entiende que son los periodos más susceptibles, en el que el material expuesto aumenta la amenaza por remoción en masa (figura 16).

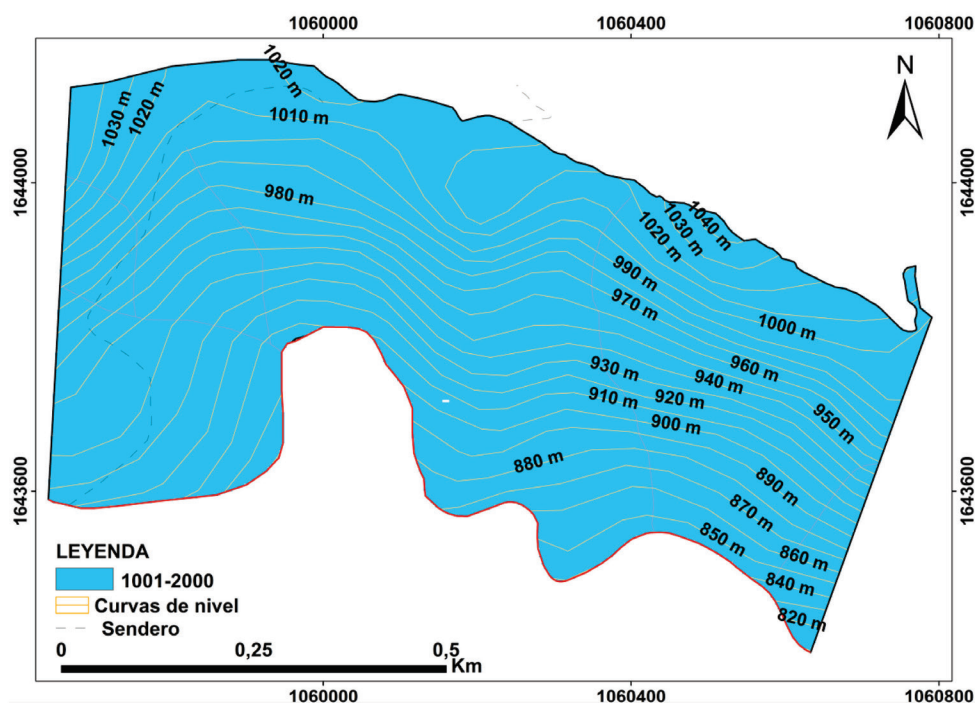
A toda el área de estudio se le otorga una calificación media (3), distribuida en el 100 % o la totalidad de la zona.

Tabla 2. Histograma de precipitación mensual multianual del municipio de Pueblo Bello, Cesar



Fuente: Ideam, 2018. Boletines climatológicos mensuales.

Figura 16. Mapa de precipitación



Fuente: elaboración propia.

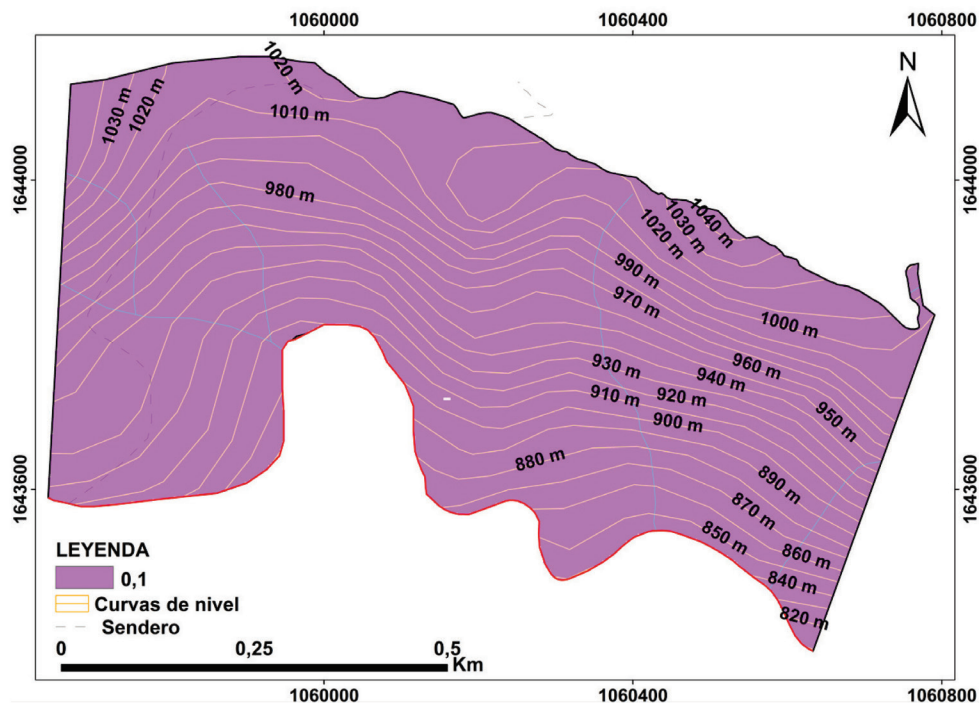
Sismos

Para el departamento del Cesar se tiene un reporte de 2595 sismos [20], comprendidos desde el 1 de junio de 1993 hasta el 1 de octubre de 2015. Para este informe se tuvieron en cuenta solo los datos históricos del municipio de Pueblo Bello, Cesar; la tectónica está influenciada por el sistema de fallas NE-SW, que comprende el macizo rocoso de la Sierra Nevada de Santa Marta (SNSM). Los sismos registrados presentan valores de magnitudes de 1,9 a 3,3 grados, según la escala de Richter, y

profundidades de 95,2 a cuatro km; estos valores no constituyen altas amenazas.

En la figura 17 se observa, como resultado, una aceleración sísmica de 0,011 (Gal), concerniente a una velocidad sísmica de 0,1 cm/s, distribuida en toda la zona correspondiente al tramo de los km 21 al 23 de la vía Zanjón-Pueblo Bello. La susceptibilidad o reclasificación de la aceleración sísmica de 0,011 se califica, según el grado de susceptibilidad a movimiento en masa, con una calificación muy baja (1) en toda el área de estudio.

Figura 17. Mapa de factor sismo



Fuente: elaboración propia.

Seguidamente se realizó el análisis respectivo de los dos mapas de amenaza por remoción en masa; uno mediante los factores de seguridad de los distintos suelos y otro más detallado por medio de la rasterización de los factores condicionantes y detonantes.

Amenaza por remoción en masa mediante factor de seguridad (F_s)

Este mapa se realiza mediante el cálculo del F_s de un mallado; en esta ocasión, a tres muestras (figuras 12, 18 y 19) representativas de cada tipo de

suelo encontrado en el área de estudio, correlacionando datos obtenidos en los ensayos de laboratorio y en las TER, los cuales se basan en el método de equilibrio límite. En este caso, se debe aplicar la ecuación de F_s para talud infinito, ya que el material expuesto es suelo.

En la figura 19 se observa la delimitación de cada tipo de suelo clasificado y el respectivo F_s , que muestra que un 60 % del área de estudio, correspondiente a las arenas finas de la facies cuar-zomonzonita, tienen un F_s de 1,22; un 30 % de la

zona es propio de las arenas arcillosas provenientes de las ignimbritas de Los Clavos y tienen un Fs de 1,48, y los limos con baja plasticidad, que ocupan un 10 % del área, presentan un Fs de 1,25.

Figura 18. a) cálculo de Fs de la muestra AMR-001 (sc); b) cálculo de Fs de la muestra AMR-006 (A-3) y c) cálculo de Fs de la muestra AMR-004 (ML)

$$FS = \frac{(c' b \sec \alpha + (\gamma b h \cos \alpha - k \gamma b h \sin \alpha - \gamma_w h_w \cos^2 \alpha) \tan \Phi')}{\gamma b h \sin \alpha + k \gamma b h \cos \alpha}$$

DATOS M1		FÓRMULAS	
PHI	13,7	F1	6862,3651
C	42,227	F2	5309,7136
Hw	4	F3	488,2532
Yw	1	F4	1,8833595
Y	20,1	F5	0,2437737
α	42,6	F6	4882,532
h	3	F7	530,97136
k	0,1	FS	1,4846673
H	110		
B	119,6241		

$$FS = \frac{(c' b \sec \alpha + (\gamma b h \cos \alpha - k \gamma b h \sin \alpha - \gamma_w h_w \cos^2 \alpha) \tan \Phi')}{\gamma b h \sin \alpha + k \gamma b h \cos \alpha}$$

DATOS M1		FÓRMULAS	
PHI	22,6	F1	3229,5186
C	30	F2	2893,3879
Hw	4	F3	321,34328
Yw	1	F4	-1,4023989
Y	20,01	F5	0,4162598
α	48	F6	3213,4328
h	3	F7	289,33879
k	0,1	FS	1,2278109
H	80		
B	72,032324		

Nivel de amenaza

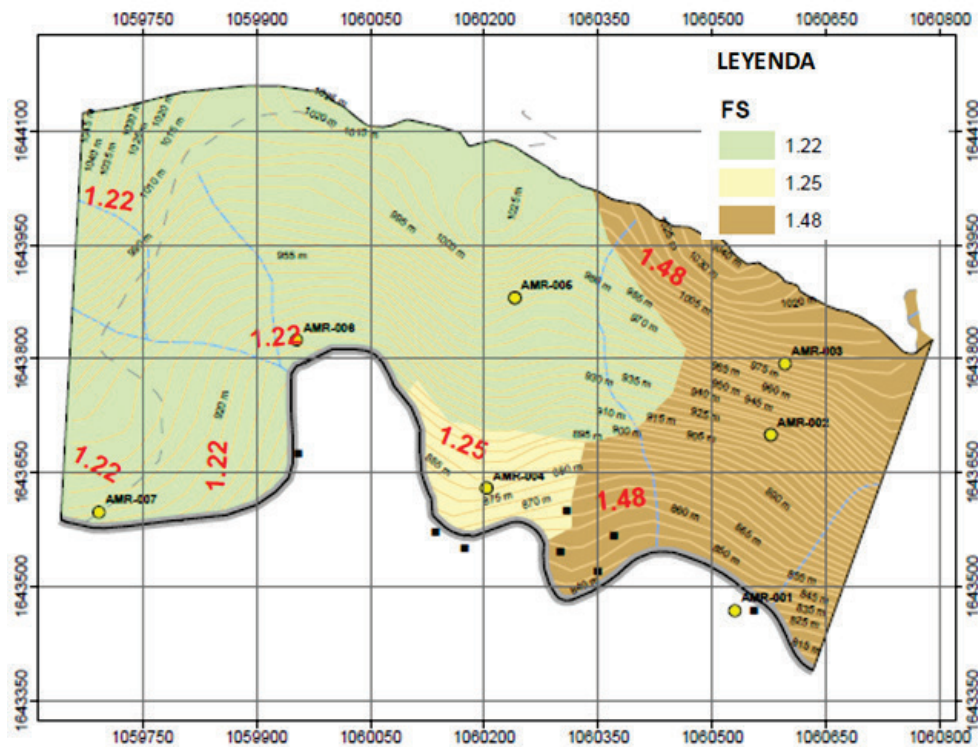
$$FS = \frac{(c' b \sec \alpha + (\gamma b h \cos \alpha - k \gamma b h \sin \alpha - \gamma_w h_w \cos^2 \alpha) \tan \Phi')}{\gamma b h \sin \alpha + k \gamma b h \cos \alpha}$$

DATOS M1		FÓRMULAS	
PHI	24,5	F1	1614,7593
C	30	F2	1446,694
Hw	4	F3	160,67164
Yw	1	F4	-1,4023989
Y	20,01	F5	0,4557263
α	48	F6	1606,7164
h	3	F7	144,6694
k	0,1	FS	1,2569889
H	40		
B	36,016162		

Nivel de amenaza

Fuente: elaboración propia.

Figura 19. Mapa de FS con relación al tipo de material del área de estudio



Fuente: elaboración propia.

Según los rangos de amenaza relacionados con el FS, otorgados por el SGC [3] (figura 2), se les da una calificación media (3) a los distintos tipos de materiales encontrados en el sector analizado, obteniendo como resultado una amenaza media en toda la zona de estudio (tabla 3).

Tabla 3. Grado de amenaza con respecto al FS de cada tipo de suelo del área

Suelo	FS	Grado de amenaza
Arena fina (A-3)	1,22	Medio (3)
Arcillosa (sc)	1,48	Medio (3)
Limo con baja plasticidad (ML)	1,25	Medio (3)

Fuente: tomado de [3].

Amenaza por remoción en masa por método heurístico

En la figura 11 se observan zonas con amenaza muy alta (5) y aparecen de manera dispersa en diferentes sectores, principalmente suroeste, oeste, este,

sureste y centro, abarcando un 15 % de toda el área investigada. Corresponden a depósitos coluviales o deslizamientos de flujos activos que se encuentran gracias al cambio de la geometría de las laderas, es decir, en los taludes de la margen derecha de la vía entre Zanjón y Pueblo Bello; igual se encuentran en los lomos denudacionales y laderas erosivas que se ven afectadas por el factor condicionante de pendiente con inclinaciones de 56 %-140 % (fuertemente montañoso/muy empinado) y por el factor detonante de precipitación, con 1001-2000 mm/multianual, lo cual produce que los granos de tamaño limo sean eliminados, generando que las arenas finas (A-3) de los suelos residuales de la facies cuarzomonzonita del Batolito de Pueblo Bello (Srb) tengan una mayor inestabilidad.

Las zonas con amenaza alta (4) se encuentran distribuidas en su mayoría al oeste, este y centro, ocupando un 60 % del área de estudio; están comprendidas por las laderas erosivas, las cuales se ven afectadas tanto por el factor condicionante de pendiente con inclinaciones de 21 %-55 % (colinado

fuertemente disectado/ empinado), como por el factor detonante de precipitación, que igual que la amenaza anterior, genera inestabilidad en las arenas finas (A-3) de los suelos residuales del Batolito de Pueblo Bello (Srb).

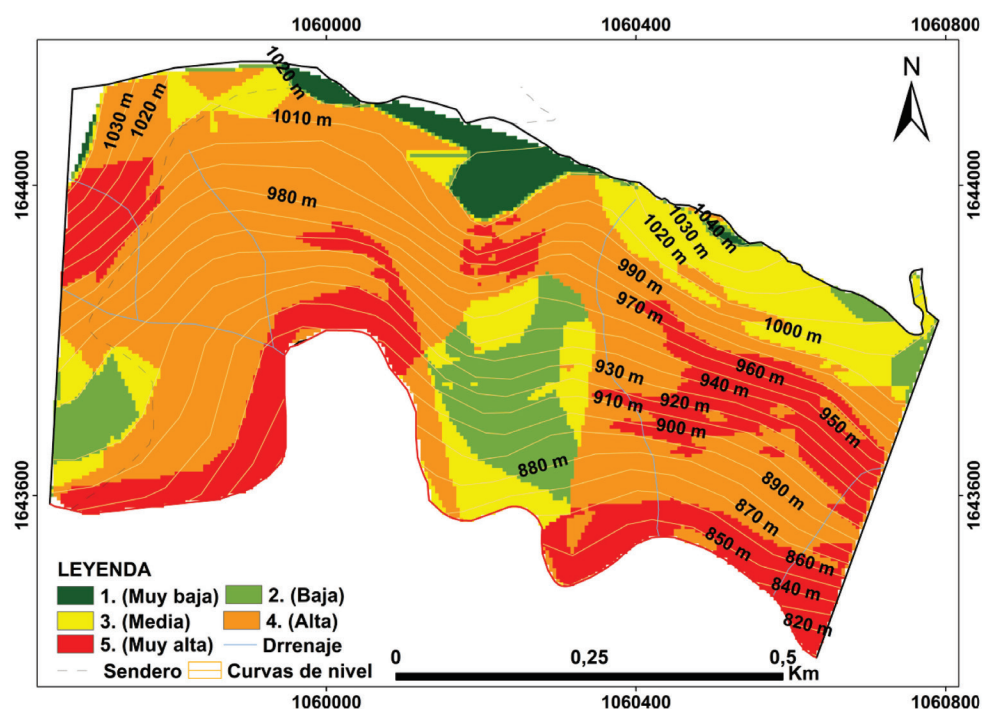
Las zonas con amenaza media (3) están esparcidas en un 15 % del área; al noroeste se asocian con las pendientes bajas del lomo residual, al suroeste con pendientes de 14 %- 20 % (moderadamente empinado) del lomo denudado, comprendidas por arenas finas (A-3) de los suelos residuales de la facies cuarzomonzonita del Batolito de Pueblo Bello (Srb), igualmente afectadas por el factor detonante de precipitación que genera menor inestabilidad por el tipo de material y pendiente. También se encuentran al noreste, en las laderas erosivas compuestas por los suelos residuales de las ignimbritas (Sri), propios de arenas arcillosas (sc).

Las zonas de amenaza baja (2) están diseminadas al suroeste, sur y, en menor cantidad, al noreste, ocupando un 5 % del área; corresponden a las pendientes altas del lomo residual que se presenta al

suroeste, compuestas por las arenas finas (A-3) de los suelos residuales de la facies cuarzomonzonita del Batolito de Pueblo Bello (Srb), por el cambio de geometría generado antrópicamente para construir un sendero. También están en las pendientes altas donde se ubican los limos con baja plasticidad (ML) y presentan este grado porque se encuentran protegidos del factor detonante de precipitación por tener una gran cantidad de cultivos.

Finalmente, las zonas con amenaza muy baja (1) están al norte, en un 5 % del área analizada; corresponden a las laderas erosivas, compuestas por arenas finas (A-3) de los suelos residuales del Batolito de Pueblo Bello (Srb), que están siendo afectados por el factor condicionante de pendiente con inclinaciones de 56-140 % (fuertemente montañoso/muy empinado) y por el factor detonante de precipitación, pero su amenaza es baja por el cambio de geometría de cresta montañosa a planicie para la creación de un sendero que atraviesa la divisoria de las laderas pertenecientes a la zona de estudio.

Figura 20. Mapa de amenaza por remoción en masa del área ubicada en el tramo del km 21 al 23 de la vía Zanjón-Pueblo Bello a escala 1:5000



Fuente: elaboración propia.

Discusiones

Los resultados obtenidos mediante la ecuación de equilibrio límite muestran diferencias significativas en los FS de los distintos tipos de suelos clasificados en el área de estudio. Las arenas finas (A-3), pertenecientes a la facies cuarzomonzonita, presentan un FS de 1,22, lo que indica una estabilidad relativamente baja en comparación con otros tipos de suelo. En cambio, las arenas arcillosas (sc), provenientes de las ignimbritas de Los Clavos, alcanzan un FS de 1,48, lo cual sugiere una mayor estabilidad. Por su parte, los limos con baja plasticidad (ML) ofrecen un FS intermedio de 1,25.

Estos valores se sitúan dentro de los rangos de amenaza por remoción en masa definidos por el Servicio Geológico Colombiano (SGC), lo que permite clasificar el área en estudio como de amenaza media (grado 3). Este resultado sugiere que, aunque no se espera una falla inminente, la estabilidad del terreno no es completamente segura y podría ser vulnerable bajo ciertas condiciones geotécnicas y ambientales. Esta clasificación debe considerarse en el diseño de medidas de mitigación y en la planificación del uso del suelo, en especial en áreas

susceptibles a cargas adicionales o cambios en la saturación del terreno.

Conclusiones

El área estudiada está conformada en su mayoría por material parental de la facies cuarzomonzonita, expuesta como suelo residual del Batolito de Pueblo Bello (Srb), muestra amenaza muy alta (5), en especial al noroeste, suroeste, este y sureste, abarcando un 15 % de toda el área; dilucida zonas con amenaza alta (4), distribuidas principalmente al oeste, este y centro, ocupando un 60 % del área; se presentan zonas con amenaza media (3), esparcidas en un 15 % del área de estudio, al noroeste y suroeste. También al noreste, conformadas por el suelo residual de las ignimbritas de Los Clavos (Sri), se exhiben zonas con amenaza baja (2), dispersas en un 5 % del área de estudio; igual al suroeste, comprendidas por el suelo residual del Batolito de Pueblo Bello (Srb), y asimismo al sur, en las pendientes altas de los suelos antrópicos (Sa); finalmente, una amenaza muy baja (1) se encuentra al norte, ocupa un 5 % del área estudiada, en las laderas erosivas compuestas por suelo residual del Batolito de Pueblo Bello.

Referencias

- [1] L. González de Vallejo, *Ingeniería geológica*. Madrid, España, 2002. [Online]. Disponible: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5540850/mod_resource/content/1/Livro_2.pdf
- [2] Función Pública, “Por el cual se reglamenta el artículo 189 del Decreto-ley 019 de 2012 en lo relativo a la incorporación de la gestión del riesgo en los planes de ordenamiento territorial y se dictan otras disposiciones,” Decreto 1807 de 2014.
- [3] G. Ávila-Álvarez *et al.*, *Guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa*. En: Guías técnicas y métodos de trabajo en geociencias y asuntos nucleares pp, Bogotá, D. C., Colombia: Servicio Geológico Colombiano, 2016. [Online]. Disponible: <https://libros.sgc.gov.co/index.php/editorial/catalog/book/32>
- [4] L. Lascarro-Navarro, J. Delgado-Rodríguez, E. Rojas-Martínez, F. Lascarro-Navarro y D. Manco-Jaraba, “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, no. 1, pp. 56-70, 2024, doi: <https://doi.org/10.15665/rpv22i1.3269>.
- [5] V. Ortiz-Maestre, C. Polo-Mendoza, D. Giraes-Puerta y D. Manco-Jaraba, “Análisis de susceptibilidad por movimientos en masa implementando el método Mora-Vahrson modificado para el corregimiento de Chemesquemena (Cesar, Colombia),” *Tecnura*, vol. 27, no. 77, pp. 1-21, 2022, doi: <https://doi.org/10.14483/22487638.19951>.
- [6] Congreso de Colombia, “Ley 388. Por la cual se modifica la Ley 9 de 1989, y la Ley 2 de 1991 y se dictan otras disposiciones,” Bogotá, D. C., Colombia, 1997.

- [7] Ideam, *Leyenda nacional de coberturas de la tierra. Metodología Corine Land Cover adaptada para Colombia, escala 1:100.000*, Editorial., vol. TH-62-04-1, no. 257. Bogotá, D. C., 2010.
- [8] Ideam, IGAC y Cormagdalena, “Metodología Corine Land Cover Adaptada para Colombia escala 1:100.000.”
- [9] Ideam, *Leyenda nacional de coberturas de la tierra, Metodología Corine Land Cover Adaptada para Colombia Escala 1:100.000*. Bogotá, D. C., Colombia, 2010.
- [10] M. Romana, “New adjustment ratings for application of Bieniawski classification to slopes,” in *Proceedings of the international symposium on role of rock mechanics, Zacatecas, México*, 1985, pp. 49-53.
- [11] Servicio Geológico Colombiano, “Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza por movimientos en masa escala 1: 100.000”, Bogotá, D. C., Colombia, pp. 1-127, 2010.
- [12] C. M. Tschanz, A. Jimeno y C. Vesga, “Geology of the Sierra Nevada de Santa Marta area (Colombia),” *Inst. Investig. e Inf. Geocientífica, Minero-Ambiental y Nucl. República Colomb.*, p. 288, 1969.
- [13] C. Tschanz, A. Jimeno, J. Cruz y U.S. Geological Survey, “Mapa Geológico de Reconocimiento de la Sierra Nevada de Santa Marta,” Bogotá, D. C., Colombia, 1969.
- [14] C. Tschanz, R. Marvin, J. Cruz B., H. Mehnert, and G. Cebula, “Geologic Evolution of the Sierra Nevada de Santa Marta, Northeastern Colombia,” *GSA Bull.*, vol. 85, no. 2, pp. 273-284, Feb. 1974, doi: 10.1130/0016-7606(1974)85<273:GEOTSN>2.0.CO;2.
- [15] F. Colmenares *et al.*, “Geología De Las Planchas 11, 12, 13, 14, 18, 19, 20, 21, 25, 26, 27, 33 Y 34,” Proyecto: “Evolución Geohistórica de la Sierra Nevada de Santa Marta”. Ministerio de Minas y Energía, Instituto Colombiano de Geología y Ministerio e Ingeominas. Accessed: Nov. 15, 2022. [Online]. Disponible: <http://recordcenter.sgc.gov.co/B12/23008010018162/documento/pdf/2105181621101000.pdf>
- [16] R. Fisher and H. Schmincke, *Pyroclastic rocks*. Springer-Verlag, Berlín, 1984.
- [17] G. Márquez-Durán, “Microzonificación geotécnica de amenaza por fenómeno de remoción en masa del tramo ubicado del km 16 al km 18 de la vía que comunica a la ciudad de Valledupar con el municipio de Pueblo Bello en el departamento del Cesar,” Fundación Universitaria del Área Andina, 2019.
- [18] J. Carvajal-Perico, *Propuesta de estandarización de la cartografía geomorfológica en Colombia*. Bogotá, D. C., Colombia, 2012.
- [19] Ideam, “Tiempo y clima,” Accessed: Jun. 16, 2024. [Online]. Disponible: http://ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/climatologico-mensual/-/document_library_display/xYvIPc4uxk1Y/view/71473013?_110_INSTANCE_xYvIPc4uxk1Y_redirect=http%3A%2F%2Fideam.gov.co%2Fweb%2Ftiempo-y-clima%2Fclimatologico-mensual%3Fp_id%3D110_INSTANCE_xYvIPc
- [20] C. Ortega, “Análisis preliminar de la actividad sísmica en el departamento del Cesar,” Valledupar, Cesar (Colombia), pp. 1-47, 2015.

