Modelación de suelos degradados debido a la explotación de caliza en municipio de Pueblo Bello (Colombia)

Modeling of degraded soils due to limestone exploitation in the municipality of Pueblo Bello (Colombia)

Jorge Eliecer Galvis Daza[1] https://orcid.org/0000-0002-2950-9770
Dino Carmelo Manco-Jaraba[2*] https://orcid.org/0000-0001-8506-094X
Carlos Edwin Camarillo Torres[1] https://orcid.org/0009-0005-2456-7241

Recibido 25 de julio de 2023, aceptado 31 de enero de 2025
Received: July 25, 2023 Accepted: January 31, 2025

RESUMEN

Durante la extracción de recursos minerales se llevan a cabo actividades de remoción de la cobertura vegetal, arranque, cargue, transporte y acopio de minerales que hacen que el paisaje sea susceptible a procesos erosivos. Esta investigación tiene por objeto modelar los suelos degradados durante la actividad minera utilizando el modelo RUSLE, mediante la integración de herramientas de los sistemas de información geográfica (SIG) en la mina Caracoli en el municipio de Pueblo Bello-Cesar (Colombia). Los resultados muestran un grado de erodabilidad con rangos que van entre 0 - 9,25 toneladas por hectárea por año (t/ha/año). Aproximadamente el 97,2% de la mina Caracoli se encuentra en la clase de erosión muy leve, leve (2,1%) y moderado el (0,7%). El desarrollo de la investigación permitió predecir el comportamiento de estos suelos lo que permitirá formular medidas de conservación eficientes y así sentar las bases para desarrollar una minería sostenible.

Palabras clave: RUSLE, erosión, municipio de Pueblo Bello; minería, Erodabilidad.

ABSTRACT

Throughout the extraction of mineral resources, various actions such as removing vegetation cover, uprooting, loading, transportation, and stockpiling minerals are carried out, thus making the landscape susceptible to erosion. This research aims to model degraded soils during mining activity using the RUSLE model by integrating geographic information system (GIS) tools at the Caracoli mine in the municipality of Pueblo Bello-Cesar (Colombia). The results show a degree of erodibility with ranges between 0 - 9.25 tons per hectare per year (t/ha/year). Approximately 97.2% of the Caracoli mine is in the highly light, light (2.1%), and moderate (0.7%) erosion class. The development of the research will make it possible to predict the behavior of these soils, which will allow the formulation of efficient conservation measures and thus lay the foundations for developing sustainable mining.

Keywords: RUSLE, erosion, municipality of Pueblo Bello, mining, erodibility.

[1] Fundación Universitaria del Área Andina. Facultad de Ciencias Básicas. Valledupar, Colombia. E-mail: jgalvis@areandina.edu.co, ingcamarillo28@gmail.com
[2] Universidad de La Guajira. Facultad de Ingenierías. Riohacha, Colombia. E-mail: dinomancojaraba@gmail.com
* Autor de correspondencia: dinomancojaraba@gmail.com

INTRODUCCIÓN

El aprovechamiento de los recursos naturales ha generado diversos impactos ambientales que han contribuido en el desequilibrio ecosistémico [1]; la minería es una actividad técnico racional que requiere diversas etapas en su desarrollo destacando la remoción de la cobertura vegetal y capa de suelo [2] ocasionando cambios de uso de suelo que contribuyen al desarrollo de procesos erosivos de superficie [3], [4].

Para hacer frente a problemas asociados a la degradación de la tierra, se debe emplear técnicas modernas que conduzcan a la captura y procesamiento de datos, lo que permitirá delimitar, modelar y predecir, el comportamiento de estos suelos y así sentar las bases para desarrollar una minería sostenible [5], [6].

En la mina Caracoli, por más de 15 años han desarrollado la extracción de caliza utilizando métodos de explotación a cielo abierto, dejando gran parte de la superficie sin cobertura vegetal ni suelo, lo que trae como consecuencia la erosión acelerada de la superficie, dejando huella ambiental que supone grandes retos para la gestión del recurso suelo en la minería. Esta investigación tiene por objeto evaluar la erosión media anual debido a la explotación de caliza en el municipio de Pueblo Bello (Colombia) utilizando el modelo RUSLE, mediante la integración de herramientas de los sistemas de información geográfica (SIG) en la mina Caracoli.

LOCALIZACIÓN

El área de estudio se encuentra ubicada al nororiente de Colombia, departamento del Cesar en la mina Caracoli al suroeste del municipio de Pueblo Bello, cubre una superficie de 56,8 hectáreas, caracterizada por presentar laderas y colinas de baja pendiente con modificaciones en su estructura topográfica generadas durante el desarrollo de actividades propias de la minería (arranque, cargue y transporte) (Figura 1).

METODOLOGÍA

Se realizó una revisión del estado del arte en bases de datos académicas y científicas; posteriormente salidas de campo para identificación de aspectos generales, toma y análisis de datos. A partir de estos se generaron capas temáticas en formato raster y se determinó la erosión media anual del suelo utilizando herramientas de los sistemas de información geográfica de acuerdo con el método RUSLE [7], [8] referido en la siguiente ecuación (1):

$$A = R * K * LS * C * P \quad (1)$$

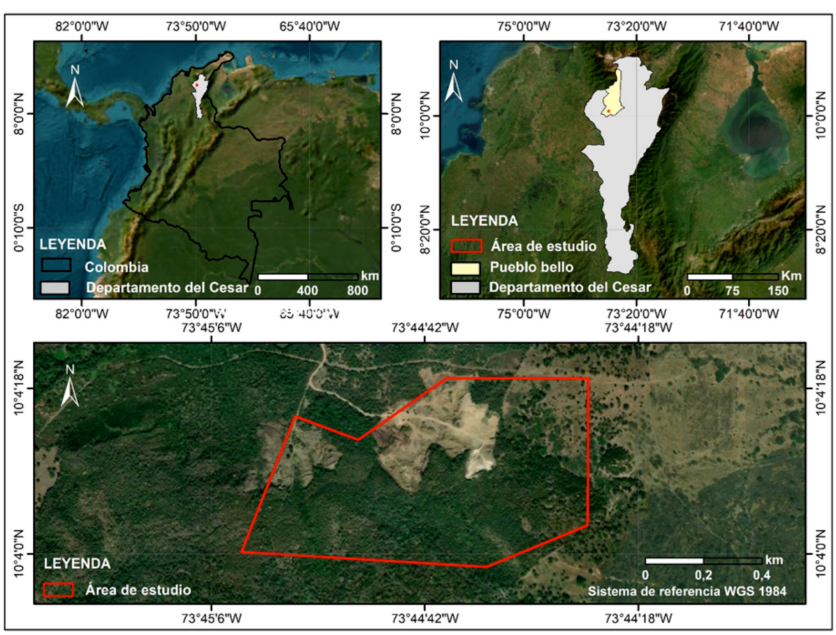


Figura 1. Localización del área de estudio.

Donde A representa la pérdida del suelo por erosión (t/ha.año), R factor de erosividad por lluvias (MJ. mm/ha h), K factor erodabilidad del suelo (t.ha.h/ ha.MJ.mm) acorde a su composición textural y contenido de carbón orgánico, LS factor de longitud y grado de inclinación de pendientes topográficas, C factor de manejo de cobertura vegetal y P factor de prácticas de manejo del suelo [9].

Factor de erosividad (R)

Se analizaron datos de precipitación de 4 estaciones meteorológicas administradas por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), de las cuales 2 se encuentran ubicadas dentro del municipio de Valledupar y 2 en el municipio de Bosconia, departamento del Cesar. Las estaciones proporcionaron registros históricos de 30 años, específicamente entre 1992 y 2022. El cálculo del factor R se realizó a partir de regresión lineal obtenida por [10], el cual ha sido ampliamente utilizada en estudios similares [11], [12], [13], desarrollados en diferentes departamentos de Colombia, ecuación (2).

$$R = EI_{30} = \sum_{1}^{12} 38{,}4 * IMF + 28{,}3 \qquad (2)$$

Para la estimación del Índice Modificado de Fournier (IMF) se utilizaron los registros históricos de precipitaciones de las estaciones meteorológicas, teniendo en cuenta la siguiente ecuación (3):

$$IMF = \sum_{i=1}^{12} \frac{P_i^2}{Pt} \qquad (3)$$

Donde Pi representa la precipitación mensual del mes "i" en (mm), desde enero hasta diciembre del año calculado, Pt es el promedio de precipitación anual (mm).

Factor de erodabilidad (K)

Se tomaron 4 muestras (M1, M2, M3 y M4) para determinar la composición textural del suelo teniendo en cuenta el tamaño de grano. Dos de las muestras se ubicaron en áreas de suelo desnudo y las dos restantes en zonas con presencia de bosque. A partir de los resultados obtenidos, se procedió a la asignación de los valores a las zonas con la misma cobertura de los lugares muestreados. Para el cálculo del factor K se empleó la ecuación (4) propuesta por [14].

$$K = \left\{0{,}2 + 0{,}3 * e^{\left[-0{,}0256 * SAN * \left(1 - \frac{SIL}{100}\right)\right]}\right\} * \left[\left(\frac{SIL}{CLA + SIL}\right)\right]^{0{,}3} * \left[1{,}0 - \frac{0{,}25 * C}{C + e^{3{,}72 - 2{,}95 * C}}\right] * \left[1{,}0 - \frac{0{,}7 * SN_1}{SN_1 + e^{(-5{,}51 + 22{,}9 * SN_1)}}\right] \qquad (4)$$

Donde K corresponde al factor de erodabilidad, SAN contenido de arena (%), SIL contenido de limo (%), CLA contenido de arcilla (%) y C contenido de carbono.

Factor topográfico (LS)

Se realizó un vuelo fotogramétrico para realizar el mapeo del área de estudio, empleando un Phantom 4 pro a una altura de vuelo de 90 metros, capturando 865 imágenes. Para el procesamiento de las fotos adquiridas se utilizó el software Agisoft Metashape del cual se generó una ortoimagen y un modelo digital de superficie (MDS) de alta resolución [15].

El MDS generado es la base para la estimación del factor LS, donde L corresponde a la distancia entre el punto de donde se origina el flujo superficial hasta el punto donde la pendiente se hace mínima ocurriendo la sedimentación y S hace referencia al valor de inclinación de la pendiente [16]. El cálculo del subfactor L se realizó a partir de la ecuación (5) propuesta por [17], empleada en el desarrollo de múltiples investigaciones en diversos países [18], [19], [20].

Donde A corresponde a la acumulación de flujo a nivel del píxel, D tamaño del píxel en metros, m exponente de la longitud de la pendiente, ecuación (6), β el variable de transición, ecuación (7) y θ la pendiente del terreno en grados (º). El mapa de pendiente se realizó utilizando las herramientas del software ArcGIS [21].

$$L = \frac{\left(A + D^2\right)^{m+1} - A^{m+1}}{22{,}13^m \times D^{m+2}} \qquad (5)$$

$$m = \frac{\beta}{1 + \beta} \qquad (6)$$

$$\beta = \frac{\sin\theta}{0{,}0896} \times \frac{1}{X + \left(sen\theta\right)^{0{,}8} + 0{,}56} \qquad (7)$$

Para el subfactor S se utilizó la ecuación (8) referenciada a continuación:

$$S = \begin{cases} 10{,}8 \times sen(\beta) + 0{,}03 \times \tan(\beta) \\ 16{,}8 \times sen(\beta) - 0{,}5 \times \tan(\beta) \end{cases} \quad (8)$$

Una vez calculado los dos factores se obtiene el factor LS, ecuación (9):

$$LS = L \times S \quad (9)$$

Factor de cobertura vegetal (C)

Se realizó una clasificación supervisada para identificar las coberturas presentes en el área de estudio, utilizando la ortofoto generada en el vuelo fotogramétrico [22]. Posteriormente, se le asignó un valor al factor C a cada cobertura tomando como referencia el estudio realizado por [23].

Factor prácticas de manejo de suelo (P)

El factor P puede adoptar valores entre 0 y 1, tomando un valor próximo a 0 indicando aquellas áreas con adecuadas prácticas de conservación y un valor próximo a 1 áreas con deficientes prácticas de conservación [24], [25].

RESULTADOS

Factor de erosividad (R)

Los valores estimados del valor R oscilan entre 4370,73 Y 4425,03 MJ.mm.ha^{-1}.h^{-1}.año^{-1} (Figura 2), clasificándose según lo planteado por [10]. Los resultados muestran que no existe una diferencia significativa de los valores de erosividad, sin embargo, los valores más elevados pueden llegar a presentarse al sureste de la mina (Tabla 1).

Algunas investigaciones han demostrado que las zonas con mayor erosividad están asociadas con áreas donde las lluvias tienen mayor intensidad y duración [26], [27], que en combinación con las condiciones derivadas de la actividad minera (suelo desnudo, pendientes pronunciadas), se crea un escenario ideal para la ocurrencia de procesos erosivos severos [28].

Factor de erodabilidad (K)

La composición textural de las muestras tomadas arrojó que los suelos presentes en la zona donde existe vegetación nativa presentan una composición arcillosa, mientras que en suelo desnudo es franco-arcillosa.

El mapa de erodabilidad (Figura 3) presenta valores entre 0 y 0,035 t.ha.h.ha^{-1}.MJ^{-1}.mm^{-1}, clasificado

Tabla 1. Factor de erosividad por promedio de precipitación mina Caracoli.

Estación	Precipitación multianual	IMF	R
Caracoli	1106,69	138,72	4245,25
Chimilaima	1079,74	142,99	4375,42
Esperanza	1330,32	169,43	5178,87
Manature	1173,58	168,25	5076,01

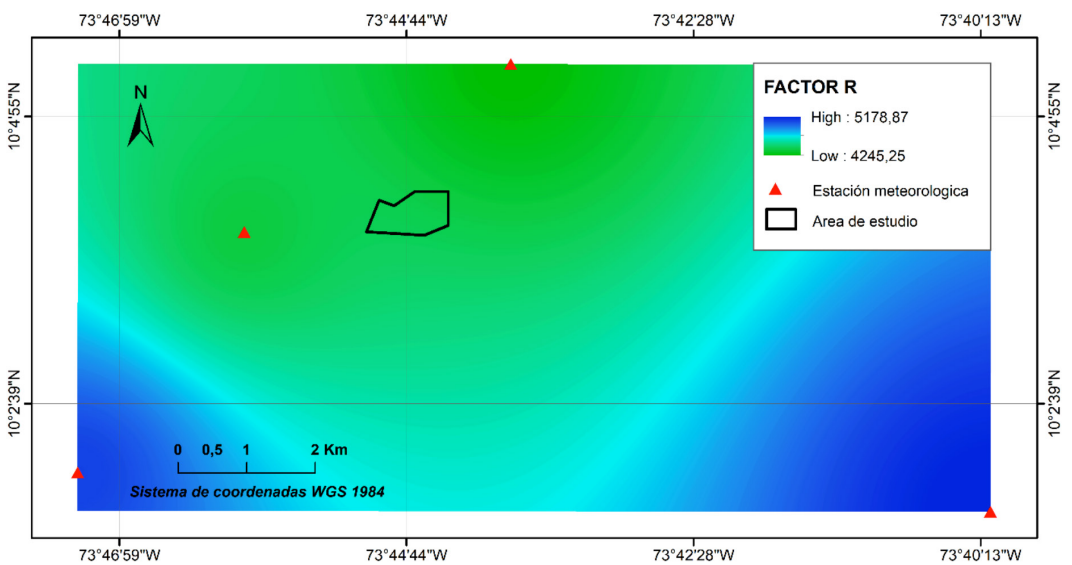


Figura 2. Factor erosividad Rusle.

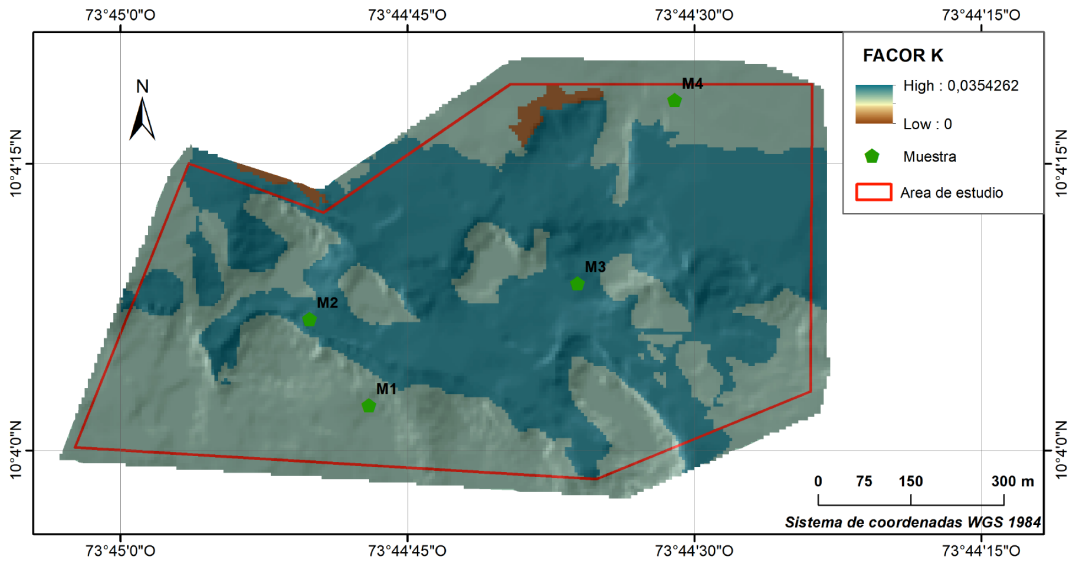


Figura 3. Factor K mina Caracoli.

como muy poco erodable según lo estipulado por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos [29]. Los valores cercanos a cero corresponden a los lugares donde hay presencia de depósitos de agua y los valores más alto correspondes a las áreas donde se encuentra el suelo desnudo el cual presenta una composición textural de arena 28%, limo 39%, arcilla 33% presentes en la muestra M2 y 28,3%, limo 38,7%, arcilla 33% para la muestra M1 (Tabla 2). De acuerdo con su composición las muestras M1 y M2 corresponden a suelos con textura Franco arcillosa, que, debido a su composición equilibrada de arena, limo y arcilla, presentan una susceptibilidad moderada a la erosión [30]. Adicionalmente, en su estudio [24] describe que suelos con K elevado, textura fina, baja estabilidad de agregados y poca materia orgánica, son más propensos a la pérdida de suelo en áreas mineras.

Factor topográfico (LS)

Se presentan altitudes entre 132 y 190 msnm, la mayor hacia el sur mientras las zonas de menor elevación se encuentran hacia el norte. Predominan las pendientes entre el 0-5% correspondiente a un 34% de la superficie del área e interés, mientras que los taludes con pendientes superiores al 50% abarca un 10% de la superficie (Figura 4).

El factor LS se encuentra entre 0.1 y 432, presentando los valores elevados en lugares de mayor pendiente, generan una mayor velocidad de escorrentía; lo que incrementa la energía erosiva del agua [31] (Figura 5).

Factor de cobertura vegetal (C)

El área presentó cuatro (4) tipos de coberturas cullo valor C para bosque nativo es de 0,001,

Tabla 2. Factor de erodabilidad.

Muestra	Superficie	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)	OC (%)	fcsand	fcl-si	forgc	fhisand	Factor K
M1	Bosque nativo	38,9	17,6	43,5	1,68	0,332	0,688	0,787	1,000	0,023688
M2	Suelo Descubierto	28	39	33	0,38	0,394	0,835	0,993	1,000	0,042991
M3	Suelo descubierto	28,3	38,7	33	0,42	0,498	0,792	0,997	1,000	0,051836
M4	Bosque nativo	38,1	18,2	43,7	1,51	0,491	0,901	0,991	1,000	0,057679

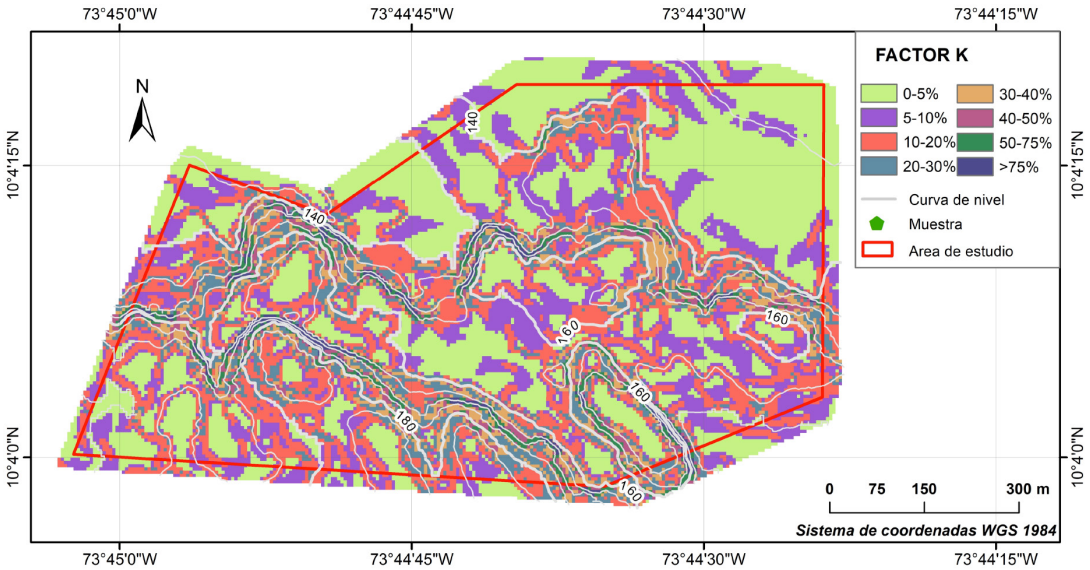


Figura 4. Elevaciones y pendientes mina Caracoli.

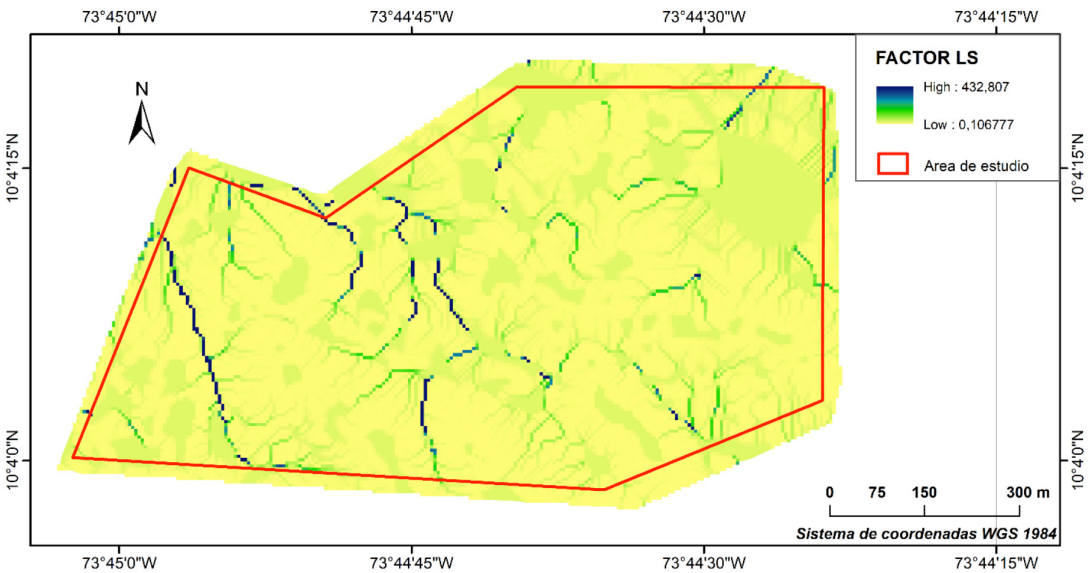


Figura 5. Factor LS mina Caracoli.

suelo desnudo (por actividad minera) 1 arbustos 0,0444 y cuerpo de agua con 0, teniendo en cuenta las consideraciones de [32] (Tabla 3) (Figura 6 y Figura 7). Los suelos desnudos reflejan una alta vulnerabilidad a la erosión mientras que los arbustos proporcionan una protección moderada, su eficacia en la intercepción de las gotas de lluvia y la reducción de la escorrentía es menor en comparación con el bosque nativo [33].

Tabla 3. Valores de referencia Factor C

Cobertura del suelo	factor C	Área m^3
Desconocida	1	0
Arbustos	0,0444	38735,93
Suelo desnudo	1	298686,28
Cuerpos de agua	0	4373,46
Bosque Nativo	0,001	226262,17

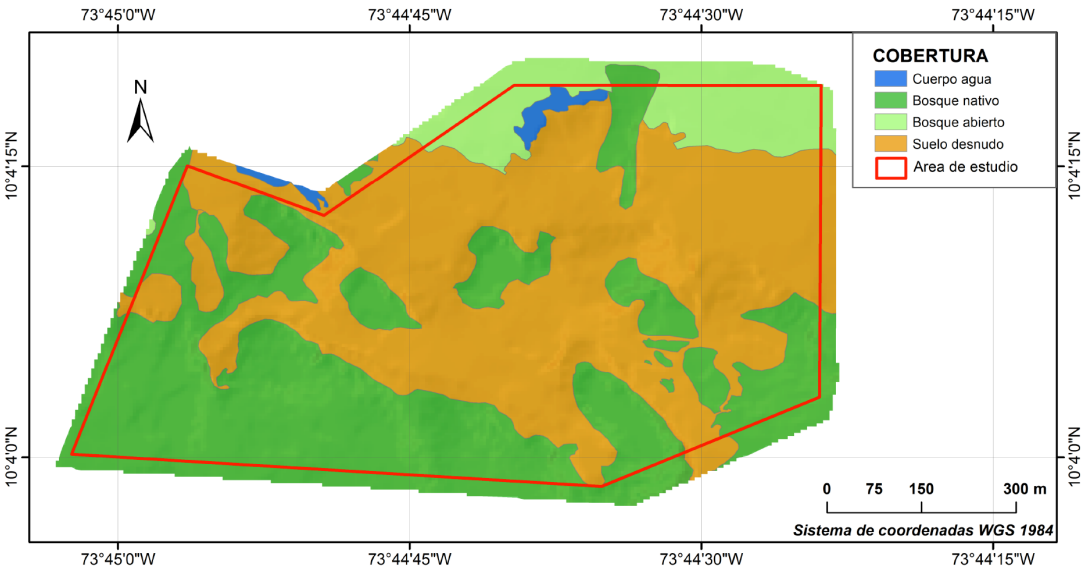


Figura 6. Mapa de cobertura mina Caracoli.

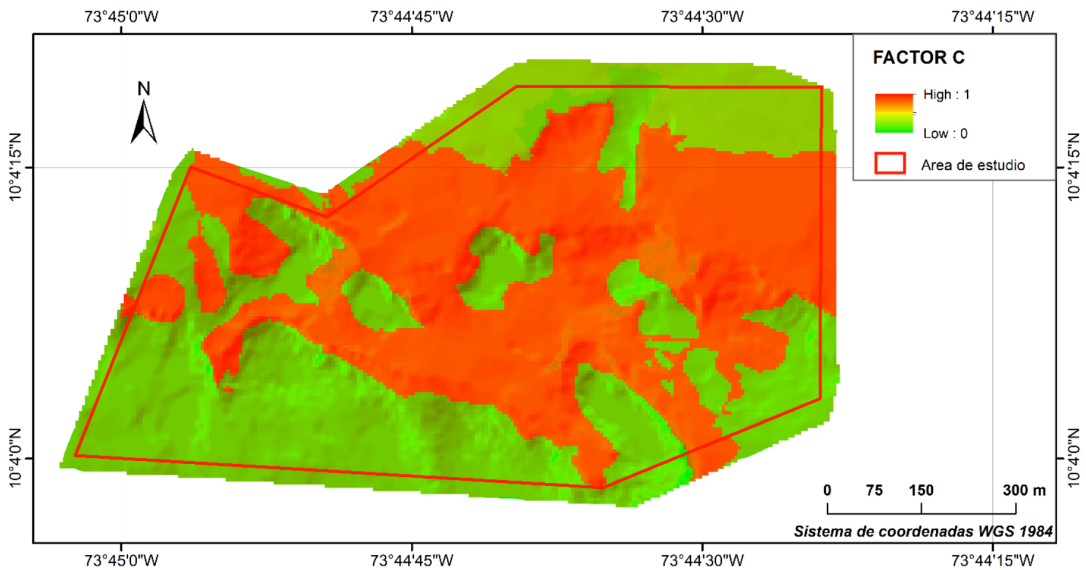


Figura 7. Factor C mina Caracoli.

Factor prácticas de manejo de suelo (P)

Para este proyecto, no se identificaron prácticas de apoyo para reducir procesos erosivos que se puedan presentar durante el desarrollo de la actividad minera, al factor P se le asignó un valor de 1 [25], [34], [35]; este valor corresponde a la condición más adversa, conlleva una vulnerabilidad extrema a la pérdida de suelo [36], lo que resulta especialmente crítico en entornos mineros.

Perdidas de suelos por erosión (A)

Los valores estimados de pérdida anual de suelo oscilan entre 0 y 9,28 t/ha/año (Figura 8). Los valores más elevados se encuentran en zonas donde el suelo se encuentra desnudo, específicamente en la dirección de acumulación del flujo (Figura 9).

La clasificación de perdida potencial de suelo se realizó teniendo en cuenta lo estipulado por [37].

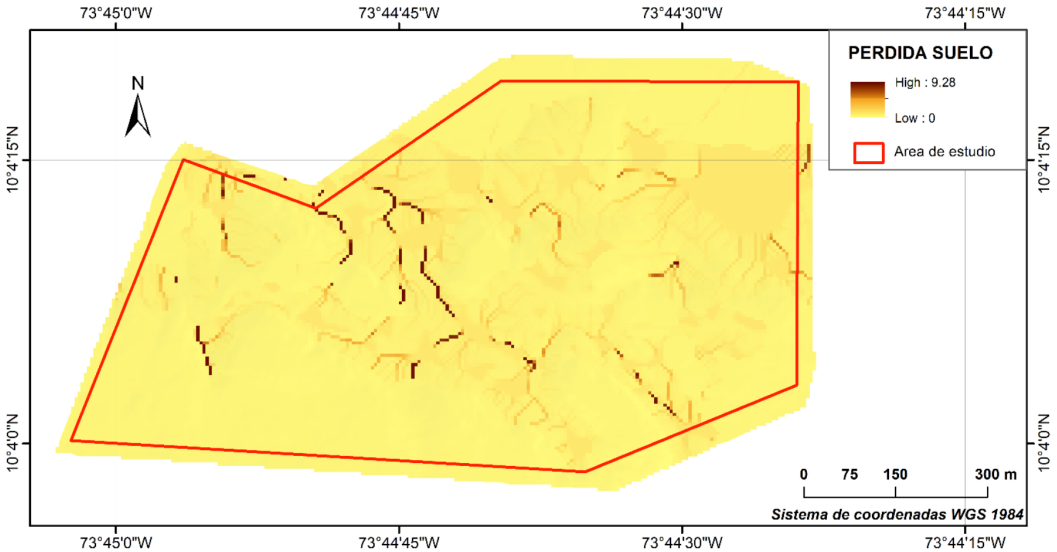


Figura 8. Pérdida estimada de suelo mina Caracoli.

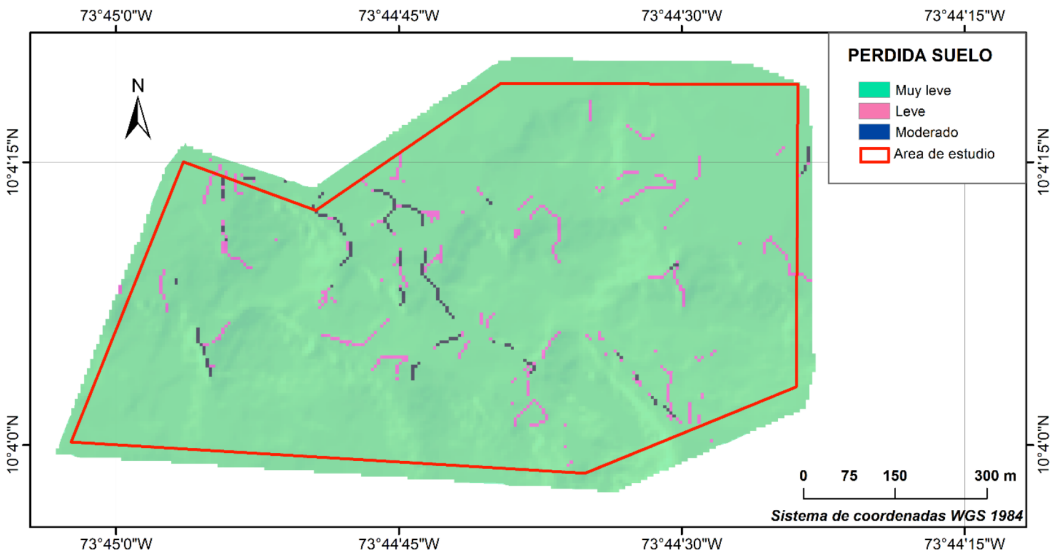


Figura 9. Mapa clasificación tasa de erosión del suelo.

Aproximadamente el 97,2% de la mina Caracoli se encuentra en la clase de erosión muy leve, leve (2,1%) y moderado el (0,7%) (Tabla 4). Aunque la mayor parte del área muestra un riesgo de erosión bajo, la existencia de zonas con pérdida moderada, especialmente en áreas sin cobertura vegetal, requiere especial atención.

El desarrollo de la investigación realiza un aporte significativo en la formulación de estrategias de conservación específicas para las zonas mineras, y la predicción del comportamiento de los suelos degradados apoya la toma de decisiones con miras al desarrollo de minería sostenible y restauración ecológica.

CONCLUSIONES

Los suelos de la mina Caracoli son de tipo Arcilloso que asociado a las bajas precipitaciones y bajo

Tabla 4. Severidad de la erosión del suelo según.

No	Pérdida suelo t.ha.año^{-1}	Clase de código	Superficie cubierta (m^2)	Área total (%)
1	<2	Muy leve	552033,53	97,2
2	2–5	Leve	12157,24	2,1
3	5–10	Moderado	3867,07	0,7
4	10–50	Alto	–	–
5	50–100	Severo	–	–
6	100–500	Muy severo	–	–
7	>500	Catastrófico	–	–
Total			568057,84	100

contenido de carbono orgánico superficial generan una susceptibilidad a la erosión baja.

El desarrollo de actividades propias de la minería ha ocasionado que el 52,6% del área de la mina presente suelos desnudos que sumado a las altas pendientes de los taludes se genere una alta probabilidad de presentar procesos erosivos.

El 97,2% de la mina presenta una erosión leve, las zonas con mayor severidad erosiva corresponden a las áreas asociadas a la acumulación de flujo producto de las escorrentías que se pueden producir debido a las precipitaciones, llegando a una tasa máxima de erosión de 9,25 t.ha.año^{-1}. Esto plantea la necesidad de construcción de obras de manejo de drenaje para evitar el deterioro de las vías debido a la erosión.

REFERENCIAS

[1] S.S. Dash, B. Sahoo, and N. Singh Raghuwanshi, "How reliable are the evapotranspiration estimates by Soil and Water Assessment Tool (SWAT) and Variable Infiltration Capacity (VIC) models for catchment-scale drought assessment and irrigation planning?," *Journal of Hydrology*, vol. 592, Art. no. 125838, 2021, doi: 10.1016/j.jhydrol.2020.125838.

[2] P. Tarolli and G. Sofia, "Human topographic signatures and derived geomorphic processes across landscapes," *Geomorphology*, vol. 255, pp. 140-161, Feb. 2016, doi: 10.1016/J.GEOMORPH.2015.12.007.

[3] J. Syvitski *et al.*, "Earth's sediment cycle during the Anthropocene," *Nature Reviews Earth & Environment*, vol. 3, pp. 179-196, 2022, doi: 10.1038/s43017-021-00253-w.

[4] F. Lehmkuhl and G. Stauch, "Anthropogenic influence of open pit mining on river floods, an example of the Blessem flood 2021," *Geomorphology*, vol. 421, art. no.108522, Jan. 2023, doi: 10.1016/J.GEOMORPH.2022.108522.

[5] L.J. Sonter, C.J. Moran, D.J. Barrett, and B.S. Soares-Filho, "Processes of land use change in mining regions," *Journal of Cleaner Production*, vol. 84, pp. 494-501, 2014, doi: 10.1016/j.jclepro.2014.03.084.

[6] M. Gastauer *et al.*, "Mine land rehabilitation: Modern ecological approaches for more sustainable mining," *Journal of Cleaner Production*, vol. 172, pp. 1409-1422, 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.10.223.

[7] M. Zerihun, M.S. Mohammedyasin, D. Sewnet, A.A. Adem, and M. Lakew, "Assessment of soil erosion using RUSLE, GIS and remote sensing in NW Ethiopia," *Geoderma Regional*, vol. 12, 2018, doi: 10.1016/j.geodrs.2018.01.002.

[8] S.N. Mhaske, K. Pathak, S.S. Dash, and D.B. Nayak, "Assessment and management of soil erosion in the hilltop mining dominated catchment using GIS integrated RUSLE model," *Journal of Environmental Management*, vol. 294, Art. no. 112987, Sep. 2021, doi: 10.1016/j.jenvman.2021.112987.

[9] B.P. Ganasri and H. Ramesh, "Assessment of soil erosion by RUSLE model using remote sensing and GIS-A case study of Nethravathi Basin," *Geoscience Frontiers*, vol. 7, no. 6, pp. 953-961, 2016, doi: 10.1016/j.gsf.2015.10.007.

[10] P.J.H. Rivera y A.A. Gómez, "Erosividad de las lluvias en la zona cafetera central Colombiana", *Cenicafé*, vol. 42, no. 2, pp. 37-52, 1991.

[11] A. Fernando, R. Ortíz y Edgar Hincapié Gómez, "Riesgo a la erosión en la zona cafetera central del departamento de caldas 1", *Cenicafé*, vol. 60, no. 2, p. 173, 2009.

[12] A. Castro, L. Lince y O. Riaño, "Determinación del riesgo a la erosión potencial hídrica en la zona cafetera del Quindío, Colombia", *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, vol. 8, no. 1, Art. no. 609718, 2017.

[13] D.C. Mosquera, C. M. López y J.C.M. Flores, "Evaluation of models to estimate rainfall erosivity in Valle del Cauca, Colombia", *Acta Agronómica*, vol. 70, no. 2, 2021, doi: 10.15446/acag.v70n2.95115.

[14] A.N. Sharpley and J.R. Williams, "EPIC-Erosion/Productivity Impact Calculator 1. Model Documentation," *U.S. Department of Agriculture Technical Bulletin,* no. 1768, p. 235, 1990.

[15] J. Xiang, J. Chen, G. Sofia, Y. Tian, and P. Tarolli, "Open-pit mine geomorphic changes analysis using multi-temporal UAV survey," *Environmental Earth Sciences*, vol. 77, no. 6, Art. no. 220, pp. 1-18, Mar. 2018, doi: 10.1007/S12665-018-7383-9.

[16] H.E. Flores, M. Martínez, J. Oropeza, E. Mejía y R. Carrillo, "Integración de la eups a un sig para estimar la erosión hídrica del suelo en una cuenca hidrográfica de Tepatitlán, Jalisco, México", *Terra Latinoamericana*, vol. 21, no. 3, pp. 233-244, 2003.

[17] P. Desmet and G. Govers, "A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units," *Journal of Soil and Water Conservation*, vol. 51, pp. 427-433, Sep. 1996.

[18] H. Zhang *et al.*, "An improved method for calculating slope length (λ) and the LS parameters of the Revised Universal Soil Loss Equation for large watersheds," *Geoderma*, vol. 308, pp. 36-45, Dec. 2017, doi: 10.1016/J.GEODERMA.2017.08.006.

[19] Q. Wu, Y. Chen, J.P. Wilson, H. Tan, and T. Chu, "A new approach for calculating the slope length factor in the Revised Universal Soil Loss Equation," *Journal of Soil and Water Conservation*, vol. 76, no. 2, pp. 153-165, Mar. 2021, doi: 10.2489/JSWC.2021.00085.

[20] A. Castro, L. Lince y O. Riaño, "Determinación del riesgo a la erosión potencial hídrica en la zona cafetera del Quindío, Colombia", *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, vol. 8, no. 1, 2017.

[21] M. Bal, A.K. Dandpat, and B. Naik, "Hydrological modeling with respect to impact of land-use and land-cover change on the runoff dynamics in Budhabalanga river basing using ArcGIS and SWAT model," *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, vol. 23, Art. no. 100527, Aug. 2021, doi: 10.1016/J.RSASE.2021.100527.

[22] L. Pádua, A. Matese, S.F. di Gennaro, R. Morais, E. Peres, and J.J. Sousa, "Vineyard classification using OBIA on UAV-based RGB and multispectral data: A case study in different wine regions," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 196, Art. no. 106905, May 2022, doi: 10.1016/J.COMPAG.2022.106905.

[23] N.B. Riquetti, C.R. Mello, D. Leandro, J. A. Guzman, and S. Beskow, "Assessment of the soil-erosion-sediment for sustainable development of South America," *Journal of Environmental Management*, vol. 321, Art. no.115933, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.jenvman.2022.115933.

[24] N. Kayet, K. Pathak, A. Chakrabarty, and S. Sahoo, "Evaluation of soil loss estimation using the RUSLE model and SCS-CN method in hillslope mining areas," *International Soil and Water Conservation Research*, vol. 6, no. 1, pp. 31-42, Mar. 2018, doi: 10.1016/J.ISWCR.2017.11.002.

[25] B.P. Ganasri and H. Ramesh, "Assessment of soil erosion by RUSLE model using remote sensing and GIS-A case study of Nethravathi Basin," *Geoscience Frontiers*, vol. 7, no. 6, pp. 953-961, 2016, doi: 10.1016/j.gsf.2015.10.007.

[26] K.H. Jodhani, D. Patel, N. Madhavan, and S.K. Singh, "Soil Erosion Assessment by RUSLE, Google Earth Engine, and Geospatial Techniques over Rel River Watershed, Gujarat, India," *Water Conservation Science and Engineering*, vol. 8, no. 1, Art. no. 49, pp. 1-17, Dec. 2023, doi: 10.1007/S41101-023-00223-X.

[27] B.P. Ganasri and H. Ramesh, "Assessment of soil erosion by RUSLE model using remote sensing and GIS - A case study of Nethravathi Basin," *Geoscience Frontiers*,

vol. 7, no. 6, pp. 953-961, Nov. 2016, doi: 10.1016/J.GSF.2015.10.007.

[28] G.K. Nigam, R.K. Sahu, M.K. Sinha, X. Deng, R.B. Singh, and P. Kumar, "Field assessment of surface runoff, sediment yield and soil erosion in the opencast mines in Chirimiri area, Chhattisgarh, India," *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, vol. 101, pp. 137-148, Oct. 2017, doi: 10.1016/J.PCE.2017.07.001.

[29] USDA, *Guía para la Evaluación de la Calidad y Salud del Suelo*. Argentina: Instituto de Suelos, 1999.

[30] L. Tadesse, K.V. Suryabhagavan, G. Sridhar, and G. Legesse, "Land use and land cover changes and Soil erosion in Yezat Watershed, North Western Ethiopia," *International Soil and Water Conservation Research*, vol. 5, no. 2, pp. 85-94, Jun. 2017, doi: 10.1016/J.ISWCR.2017.05.004.

[31] S. Schmidt, S. Tresch, and K. Meusburger, "Modification of the RUSLE slope length and steepness factor (LS-factor) based on rainfall experiments at steep alpine grasslands," *MethodsX*, vol. 6, pp. 219-229, 2019, doi: 10.1016/j.mex.2019.01.004.

[32] N.B. Riquetti, C.R. Mello, D. Leandro, J. A. Guzman, and S. Beskow, "Assessment of the soil-erosion-sediment for sustainable development of South America," *Journal of Environmental Management*, vol. 321, Art. no. 115933, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.jenvman.2022.115933.

[33] P.M.S. Macedo, P.T.S. Oliveira, M.A.H. Antunes, V.L. Durigon, E.C.C. Fidalgo, and D.F. de Carvalho, "New approach for obtaining the C-factor of RUSLE considering the seasonal effect of rainfalls on vegetation cover," *International Soil and Water Conservation Research*, vol. 9, no. 2, pp. 207-216, Jun. 2021, doi: 10.1016/J.ISWCR.2020.12.001.

[34] D.D. Alexakis, D.G. Hadjimitsis, and A. Agapiou, "Integrated use of remote sensing, GIS and precipitation data for the assessment of soil erosion rate in the catchment area of 'Yialias' in Cyprus," *Atmospheric Research*, vol. 131, pp. 108-124, Sep. 2013, doi: 10.1016/j.atmosres.2013.02.013.

[35] N. Kayet, K. Pathak, A. Chakrabarty, and S. Sahoo, "Evaluation of soil loss estimation using the RUSLE model and SCS-CN method in hillslope mining areas," *International Soil and Water Conservation Research*, vol. 6, no. 1, pp. 31-42, Mar. 2018, doi: 10.1016/J.ISWCR.2017.11.002.

[36] N.C. Wijesundara, N.S. Abeysingha, and D.M.S.L.B. Dissanayake, "GIS-based soil loss estimation using RUSLE model: a case of Kirindi Oya river basin, Sri Lanka," *Modeling Earth Systems and Environment*, vol. 4, no. 1, pp. 251-262, Apr. 2018, doi: 10.1007/S40808-018-0419-z.

[37] T.A. Duguma, "Soil erosion risk assessment and treatment priority classification: A case study on guder watersheds, Abay river basin, Oromia, Ethiopia," *Heliyon*, vol. 8, no. 8, Art. no. e10183, Aug. 2022, doi: 10.1016/J.HELIYON.2022.E10183.