

Estimación de la erosión hídrica del suelo basada en RUSLE, SIG y teledetección

Estimation of soil water erosion based on RUSLE, GIS and remote sensing

 Dayma Sadami Carmenates Hernández^{1*},  Maiquel López Silva¹,
 Oscar Brown Manrique² and  Rider Riveras Hernández²

¹Universidad Católica Sedes Sapientiae, Facultad de Ingeniería, Departamento de Investigación, Los Olivos, Lima, Perú. E-mail: mlopezs@ucss.edu.pe

²Universidad de Ciego de Avila Máximo Gómez Báez, Ciego de Avila, Cuba. E-mail: obrown@unica.cu

*Autora para correspondencia: Dayma Sadami Carmenates Hernández, e-mail: dcarmenates@ucss.edu.pe

RESUMEN: La degradación del suelo constituye el principal desafío ecológico en las unidades hidrográficas, debido a que provoca una disminución en la fertilidad del suelo. El cambio climático y los factores antropogénicos empeoran este problema. Con base en lo anterior, el propósito de la investigación fue estimar la pérdida del suelo por erosión hídrica en la cuenca del río Rímac. Para esto, se usaron diversas herramientas, como la teledetección (RS), el Sistema de Información Geográfica (SIG) y la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada (RUSLE). El hallazgo reveló que la cuenca tiene una pérdida de suelo anual de 135 t ha⁻¹ año⁻¹. Se propuso una clasificación de erosión hídrica en la que el 15,30%, el 50,43% y el 34,27% del área está clasificado como de alta, media y baja prioridad, respectivamente. Al integrar el modelo RUSLE con SIG y teledetección, se pudo calcular y ubicar con exactitud la erosión del suelo por agua, señalando las zonas de intervención más urgentes y reforzando así la toma de decisiones para manejar el recurso suelo de manera sostenible.

Palabras clave: suelos agrícolas, degradación del suelo, análisis espacial, NDVI.

ABSTRACT: Soil degradation is the main ecological challenge in hydrographic units, as it leads to a decrease in soil fertility. Climate change and anthropogenic factors exacerbate this problem. Based on this, the purpose of this research was to estimate soil loss due to water erosion in the Rímac River basin. To this end, various tools were used, such as remote sensing (RS), Geographic Information Systems (GIS), and the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). The findings revealed that the basin has an annual soil loss of 135 t ha⁻¹ year⁻¹. A classification of water erosion was proposed in which 15.30%, 50.43%, and 34.27% of the area are classified as high, medium, and low priority, respectively. By integrating the RUSLE model with GIS and remote sensing, it was possible to accurately calculate and locate soil erosion caused by water, identifying the most urgent intervention areas and thus strengthening decision-making for the sustainable management of soil resources.

Keywords: agricultural soils, soil degradation, spatial analysis, NDVI.

INTRODUCCIÓN

Las cuencas hidrográficas se ven afectadas por retos importantes, como las sequías extremas, la deforestación, las inundaciones y prácticas agrícolas inadecuadas que causan erosión del suelo. Los procesos erosivos conducen a la eliminación de la materia orgánica, capacidad de retención de nutrientes y agua en la capa superior del suelo provocando baja producción de alimentos e inseguridad alimentaria. Por consiguiente, la erosión del suelo es un problema ambiental global que afecta de forma negativa la productividad del ecosistema natural y la agricultura sostenible en las cuencas (Negese *et al.*, 2021).

El proceso de erosión del suelo es el desprendimiento, transporte y deposición de partículas de la capa superior del suelo causado por diferentes procesos naturales (Ugese *et al.*, 2022).

El tipo de erosión hídrica en particular, es significativa debido a que la topografía y la intensidad de las lluvias arrastran las partículas con mayor velocidad hasta los ríos. Asimismo, el transporte de elevados volúmenes de sedimentos provocado por la erosión reduce la capacidad de las obras de toma fluviales, las plantas de tratamiento de agua potable, el almacenamiento y la vida útil de los embalses (Alí, *et al.*, 2023).

Recibido: 10/10/2025

Aceptado: 04/03/2026

Conflicto de intereses: los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Contribuciones de autores: **Conceptualización:** Maiquel López Silva. **Curación de datos:** Dayma Sadami Carmenates Hernández, Oscar Brown Manrique, Rider Riveras Hernández. **Investigación:** Maiquel López Silva. **Metodología:** Maiquel López Silva, Dayma Sadami Carmenates Hernández, Oscar Brown Manrique, Rider Riveras Hernández. **Supervisión:** Maiquel López Silva, Dayma Sadami Carmenates Hernández, Oscar Brown Manrique, Rider Riveras Hernández. **Validación:** Maiquel López Silva, Oscar Brown Manrique, Rider Riveras Hernández. **Redacción, borrador original:** Oscar Brown Manrique, Dayma Sadami Carmenates Hernández, Maiquel López Silva, Rider Riveras Hernández. **Redacción, revisión y edición:** Dayma Sadami Carmenates Hernández, Maiquel López Silva, Oscar Brown Manrique, Rider Riveras Hernández.

La mención de marcas comerciales de equipos, instrumentos o materiales específicos obedece a fines de identificación, no existe ningún compromiso promocional relacionado con los mismos, ni para los autores ni para el editor



La Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada (RUSLE) es el modelo más utilizado para la predicción de la pérdida de suelo por su compatibilidad con las tecnologías geoespaciales, autenticidad, simplicidad y precisión (Ghosh et al., 2022). En la actualidad, el empleo del Sistema de Información Geográfica (SIG) y de la Teledetección (RS) ha incrementado notablemente la exactitud y eficiencia del modelo RUSLE (Efthimiou et al., 2020). Según Phinzi y Ngetar (2019), la ecuación RUSLE, al integrar SIG y RS, permite una representación confiable y práctica de la distribución espacial de la erosión del suelo. Por consiguiente, el objetivo del estudio es estimar la pérdida de suelo en la cuenca del río Rímac en Perú, basado en RUSLE, SIG y RS.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se realizó el estudio en la cuenca del río Rímac, que ocupa un área de 3 503,95 km² y tiene una longitud de 145 km. Su punto de origen se encuentra en la vertiente occidental de la cordillera de los Andes, a una altitud de 5508 msnm, y desemboca en el océano Pacífico (Figura 1). Pertenece a la zona árida y semiárida, la vegetación natural solo se aprecia en la cuenca alta, la cuenca media baja carece de vegetación que es de fácil erosión ante las precipitaciones pluviales, generando huaycos, deslizamientos y derrumbes. La cuenca del río Rímac desempeña un papel crucial dado que constituye la principal fuente de agua dulce para la capital peruana.

Primero, se llevó a cabo la recolección de información mediante técnicas de teledetección. Esto posibilitó la obtención del modelo digital de elevación (DEM), el cual fue extraído del <https://www.idep.gob.pe/geovisor/Visor-DeMapas/>. La información se procesó en el SIG de la plataforma ArcGIS Pro 3.0. Además, se tomó una serie histórica de 25 años (1998-2022) de precipitaciones en 9 estaciones pluviométricas brindada por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAHMI). La Figura 2 muestra el modelo metodológico.

La estimación del factor R fue mediante la ecuación de Renard y Freimund (1994) que se establece mediante la ecuación (1). Para el factor K se aplicaron las ecuaciones (2) y (3), desarrolladas por Renard (1997).

El factor LS, como la relación de la longitud de la pendiente y su inclinación, fue obtenido a partir de la dirección del flujo con el MDT, expresado por la ecuación (4). Mientras que, el factor C se obtuvo mediante el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) que se muestra en la ecuación (5) y (6).

$$R = 0,0483 \times p^{1,61} \quad (1)$$

$$K = 0,034 + 0,0405 \times \exp\left[-0,5 \left(\frac{\log D_g + 1,659}{0,7101}\right)^2\right] \quad (2)$$

$$D_g = \exp\left(\sum f_i \ln\left(\frac{d_i + d_{i-1}}{2}\right)\right) \quad (3)$$

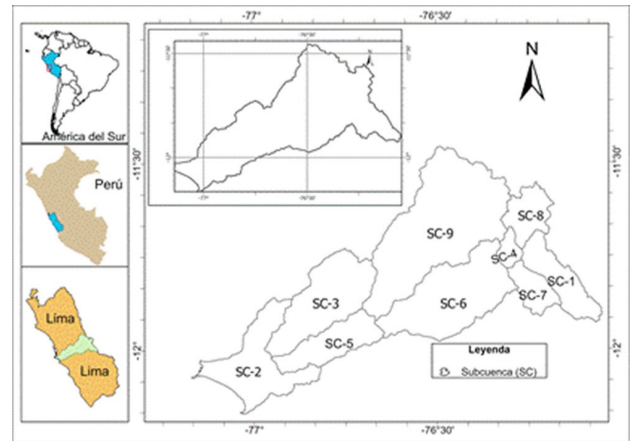


Figura 1. Cuenca del río Rímac.

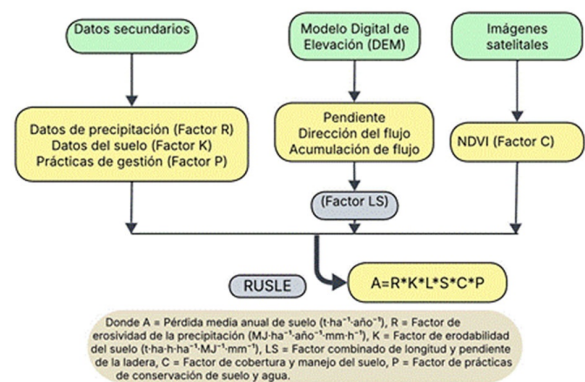


Figura 2. El modelo de la metodología.

$$LS = \{FA \times (\text{tamaño de celda}/23,13)\}^{0,4} \times \{\sin(\text{pendiente de DEM} \times 0,01745)/0,09\}^{1,3} \times 1,6 \quad (4)$$

$$NDVI = \frac{(NIR - Red)}{(NIR + Red)} \quad (5)$$

$$C = \exp\left[\alpha \frac{NDVI}{(\beta - NDVI)}\right] \quad (6)$$

Donde R es la medida de la erosividad de la lluvia expresada en (MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ año⁻¹), P es la precipitación anual promedio (mm), D_g la media geométrica del tamaño de partícula, para las clases de textura de arcilla, limo y arena, d_i, d_{i-1} es el diámetro máximo y mínimo del tamaño de partícula, respectivamente y f_i la fracciones de masa, LS la longitud de pendiente y factor de inclinación de la pendiente, FA acumulación de flujo, NIR y RED son las bandas de infrarrojo cercano y rojo, respectivamente, el valor del NDVI varía entre (-1 y 1), donde -1 implica suelo desnudo y 1, bosque, α y β coeficientes ajustados con valores de α = 2, β = 1. Por último, el factor P fue analizado a partir de las prácticas de apoyo por Mckague (2023).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se establecieron 9 subcuencas (SC) dentro de la cuenca. En las cuales se determinaron los parámetros de RUSLE por SC. Uno de los parámetros más importantes del modelo RUSLE es el Factor de Erosividad de la Lluvia (R), ya que las gotas de lluvia contribuyen a la erosión del suelo. Las precipitaciones en la cuenca, en este marco, muestran una distribución espacial y temporal de manera significativa. Las estaciones de pluviosidad de la cuenca se ilustran en la [Tabla 1](#). Es evidente que las precipitaciones se incrementan a medida que la altitud sobre el nivel del mar es mayor, lo que se debe al aire más frío, el cual propicia la condensación del agua. Por lo tanto, la SC-8 ha anotado las precipitaciones anuales promedio más notables en los últimos 25 años, alcanzando una cifra de 925,7 mm.

Los resultados indican una notable variabilidad espacial en el índice de erosividad de la lluvia en la cuenca, con las cifras más altas situadas en el área noroeste alta, sobre todo en la subcuenca SC-9, donde se llega a un máximo de 933,73 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ año⁻¹. La mezcla de lluvias más cargadas y concentradas, vinculadas al efecto orográfico típico de las zonas de mayor altura, junto a pendientes empinadas que aumentan la energía del escurrimiento superficial y, por lo tanto, el potencial erosivo, puede ser la causa de este comportamiento. En contraste, las subcuencas SC-2 y SC-5, situadas en la parte suroeste de la cuenca, tienen una erosividad significativamente más baja a 42,72 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ año⁻¹ o menos. Esto se debe principalmente a que estas áreas más áridas presentan un régimen de precipitaciones reducido y de menor intensidad. Además, la baja frecuencia de eventos extremos y la energía cinética de lluvia limitada en esta área limitan el desarrollo de procesos erosivos significativos, incluso si la cobertura vegetal no es abundante. En resumen, estos resultados muestran que la erosividad de la lluvia en la cuenca se encuentra muy influenciada por elementos topográficos y climáticos, lo cual pone de manifiesto lo relevante que es tener en cuenta la diversidad espacial del factor R cuando se estima la erosión hídrica del suelo.

El Factor de Erosionabilidad del Suelo (K) se calculó para las clases de suelo utilizando clasificaciones de textura del

suelo y colores del suelo según los estándares de la *FAO* por [Schoeneberger et al. \(2012\)](#). La región de estudio presentó únicamente tres tipos de suelos: el Regosol éutrico, que representa el 5,74% del área total de la cuenca; el Leptosol, que ocupa el 82,70%; y el Fluvisol éutrico, que abarca el 11,56%. En lo que respecta a los suelos Leptosol, estos son formaciones desarrolladas por rodadura y consolidadas por calizas, rocas volcánicas, areniscas, lutitas y cuarcitas. En la cuenca del río Rímac, el factor K varía entre 0,001 y 0,02 t MJ⁻¹ Ja⁻¹ mm⁻¹. Un valor de K alto indica una mayor vulnerabilidad a la erosión del suelo, mientras que un valor K más bajo indica una menor vulnerabilidad a la erosión ([Gitima et al., 2023](#)).

El factor C se determinó de acuerdo al valor asociado del Uso de la Tierra/Cobertura de la Tierra (LULC) que permitió generar mapas de Uso/Cobertura Terrestre (LULC) e Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) ([Ugese et al., 2022](#)). El factor C ponderado en las subcuencas definidas, oscilaron entre 0,001 a 1. En las subcuencas SC-3 y SC-5 se observaron valores bajos, indicativos de suelos sin cobertura vegetal y más propensos a la erosión.

El factor P obtenido a partir de la inclinación de las prácticas de gestión de cultivos en franjas, terrazas y contornos osciló entre 0,66 y 0,97 debido al predominio en la región SC-4 y SC-6 de zonas que no tienen prácticas conservacionistas. El análisis de los parámetros del método RUSLE [Tabla 2](#) mostró que la pérdida media anual por erosión hídrica en la cuenca del río Rímac durante el periodo estudiado fue de 135 toneladas por hectárea y año.

"La SC-9, dentro del análisis a nivel de subcuencas, fue la que presentó el porcentaje medio anual de erosión hídrica más alto, con 35,58 t ha⁻¹ año⁻¹. Este porcentaje abarcó cerca del 30 % del área erosionada en su totalidad y ocupó la posición más alta en el ranking de vulnerabilidad a la pérdida de tierra en la cuenca del río Rímac ([Figura 3](#)). La existencia de pendientes muy inclinadas, una erosividad alta de la lluvia y una cobertura vegetal que es escasa o estacional son condiciones que aumentan la energía del escurrimiento superficial y favorecen el transporte y desprendimiento de partículas del suelo. Este comportamiento puede ser explicado por la presencia simultánea de estos factores desfavorables.

Tabla 1. Estaciones pluviométricas y factor R de las subcuencas

| Estación | Altitud sobre el nivel del mar (msnm) | | Precipitaciones anuales promedio | | | R (MJ mm ha ⁻¹ h ⁻¹ año ⁻¹) |
|-------------------|---------------------------------------|---|----------------------------------|----------|-------|---|
| | | | Mínimo | Máximo | Media | |
| Casapalca | 4294 | 1 | 469,10 | 1 159,8 | 724,6 | 439,17 |
| Campo de Marte | 117 | 2 | 2,90 | 180,80 | 16,70 | 3,50 |
| Ñaña | 460 | 3 | 1,00 | 240,0 | 13,60 | 4,00 |
| Matucana | 2479 | 4 | 211,70 | 474,20 | 320,3 | 136,99 |
| Chosica | 867 | 5 | 1,10 | 106,50 | 28,70 | 5,16 |
| Autisha | 2220 | 6 | 4,30 | 440,20 | 219,3 | 85,18 |
| San José de Parac | 3829 | 7 | 415,90 | 795,30 | 674,8 | 393,32 |
| Milloc | 4384 | 8 | 522,20 | 1 369,60 | 925,7 | 619,77 |
| Carampoma | 3424 | 9 | 252,80 | 705,00 | 495,3 | 255,53 |

Tabla 2. Valores de la estimación de la erosión hídrica del suelo por microcuencas

| Subcuencas | RUSLE (t ha ⁻¹ año ⁻¹) | Área (km ²) | Área (%) | Clasificación |
|------------|---|-------------------------|----------|---------------|
| SC-1 | 27,14 | 235,75 | 6,73 | 3 |
| SC-2 | 0,12 | 441,03 | 12,59 | 9 |
| SC-3 | 0,99 | 492,31 | 14,05 | 7 |
| SC-4 | 4,02 | 55,92 | 1,60 | 6 |
| SC-5 | 0,82 | 267,60 | 7,64 | 8 |
| SC-6 | 12,01 | 633,71 | 18,09 | 5 |
| SC-7 | 24,70 | 130,43 | 3,72 | 4 |
| SC-8 | 29,92 | 169,81 | 4,85 | 2 |
| SC-9 | 35,58 | 1077,37 | 30,75 | 1 |
| Total | 135,30 | | | |

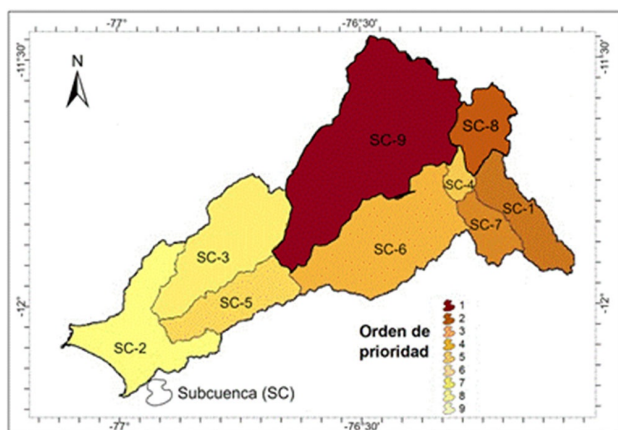


Figura 3. Distribución espacial del orden de prioridad por subcuenca.

En comparación, la subcuenca SC-2 mostró una erosión hídrica media anual mucho menor, de solo 0,12 t ha⁻¹ año⁻¹. Esto equivale al 12,59 % del área erosionada y la ubica en el noveno puesto de la clasificación. Esto se debe principalmente a un régimen de lluvias con poca intensidad y reducido, además de inclinaciones menos pronunciadas que limitan la formación de escorrentía y, por lo tanto, el surgimiento de procesos erosivos significativos. Estas disparidades demuestran el gran impacto que tiene la topografía y el régimen de precipitaciones sobre cómo se distribuye espacialmente la erosión hídrica en la cuenca.

CONCLUSIONES

- El estudio actual permitió una valoración integral de la erosión hídrica del suelo en la cuenca del río Rímac. Esto se logró a través de la utilización conjunta del modelo RUSLE, SIG y las técnicas de teledetección, lo que hizo más fácil definir nueve subcuencas y caracterizar espacialmente los elementos que rigen la pérdida de terreno. Los hallazgos muestran que la cuenca tiene una pérdida media de 135 t ha⁻¹ año⁻¹, lo que pone de manifiesto una notable variabilidad espacial del proceso erosivo. En particular, la subcuenca SC-9 presenta los niveles más altos de degradación, con una pérdida máxima de 35,58 t ha⁻¹ año⁻¹. Esto equivale a cerca del 30 % de la

superficie total de la cuenca y señala que es un área crítica con gran riesgo de erosión hídrica.

- Se logró categorizar la cuenca en tres zonas: 535,99 km² (15,30% del área total) con alta prioridad, 1767,0 km² (50,43%) con prioridad media y 1200,94 km² (34,27%) con baja prioridad.
- Estos hallazgos destacan la importancia conjunta de los elementos topográficos, climáticos y de cobertura vegetal en la erosión, y subrayan que las perspectivas integradas basadas en SIG y teledetección son instrumentos efectivos para determinar zonas prioritarias para la administración sostenible del suelo y la planificación de acciones de conservación en cuencas andinas.
- Para mejorar la priorización espacial de subcuencas y optimizar la toma de decisiones en el manejo sostenible del suelo, se aconseja que investigaciones futuras incorporen en el método RUSLE enfoques de análisis multicriterio, como el cálculo de un Valor Compuesto (CV), el Análisis de la Suma Ponderada (WSA) y el Proceso de Jerarquía Analítica (AHP). Además, se recomienda incluir el Análisis de Componentes Principales (PCA) para determinar la interacción y el impacto relativo entre los factores R, K, LS, C y P. Esto disminuiría la incertidumbre y fortalecería la solidez estadística del modelo de erosión.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALÍ, A.A.; AL-ABBADI, A.M.; JABBAR, F.K.; ALZHRANI, H.; HAMAD, S.: "Predicción de la tasa de erosión del suelo en subcuencas transfronterizas en Ali Al-Gharbi, sur de Irak, utilizando el modelo GIS basado en RUSLE", *Sustainability*, 15(3): 1776., 2023, DOI: <https://doi.org/10.3390/su15031776>.
- EFTHIMIOU, N.; PSOMIADIS, E.; PANAGOS, P.: "Fire severity and soil erosion susceptibility mapping using multi-temporal Earth Observation data: The case of Mati fatal wildfire in Eastern Attica, Greece", *Catena*, 187: 104320, 2020, ISSN: 0341-8162, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104320>.

- GHOSH, A.; RAKSHIT, S.; TIKLE, S.; DAS, S.; CHATTERJEE, U.; PANDE, C.; MATTAR, M.: “Integration of GIS and remote sensing with RUSLE model for estimation of soil erosion.”, *Land*, 12(1): 116, 2022, DOI: <https://doi.org/10.3390/land12010116>.
- GITIMA, G.; TESHOME, M.; KASSIE, M.; JAKUBUS, M.: “Quantifying the impacts of spatiotemporal land use and land cover changes on soil loss across agroecologies and slope categories using GIS and RUSLE model in Zoa watershed, southwest Ethiopia”, *Ecological Processes*, 12(1): 24, 2023, ISSN: 2192-1709, DOI: <https://doi.org/10.1186/s13717-023-00436-x>.
- MCKAGUE, K.: “Loss Equation. Ministry of agriculture, food and rural affairs”: Ontario, Canada”, *Universal Soil Loss Equation (RUSLE)*”. Universal Soil Loss Equation (RUSLE)”, 2023, ISSN: 1198-712X.
- NEGESE, A.; FEKADU, E.; GETNET, H.: “Potential soil loss estimation and erosion-prone area prioritization using RUSLE, GIS, and remote sensing in Chereti Watershed, Northeastern Ethiopia”, *Air, Soil and Water Research*, 14: 1178622120985814, 2021, ISSN: 1178-6221, DOI: <https://doi.org/10.1177/1178622120985814>.
- PHINZI, K.; NGETAR, N.S.: “The assessment of water-borne erosion at catchment level using GIS-based RUSLE and remote sensing: A review. International Soil and Water Conservation Research, 7 (1), 27-46”, *International Soil and Water Conservation Research*, 7(1): 27-46, 2019, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2018.12.002>.
- RENARD, K.G.: *Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)*, Ed. US Department of Agriculture, Agricultural Research Service, 384 p., 1997, ISBN: 0-16-048938-5.
- RENARD, K.G.; FREIMUND, J.R.: “Using monthly precipitation data to estimate the R-factor in the revised USLE”, *Journal of hydrology*, 157(1-4): 287-306, 1994, ISSN: 0022-1694.
- SCHOENEBERGER, P.J.; WYSOCKI, D.A.; BENHAM, E.C.: *Field book for describing and sampling soils*, Ed. Government Printing Office, Natural Resources Conservation Service, National Soil Survey Center, Lincoln, NE ed., 2012, ISBN: 0-16-091542-2.
- UGESE, A.A.; AJIBOYE, J.O.; IBRAHIM, E.S.; GAJERE, E.N.; ITSE, A.; SHABA, H.A.: “Soil loss estimation using remote sensing and RUSLE model in Koromi-Federe catchment area of Jos-East LGA, Plateau State, Nigeria”, *Geomatics*, 2(4): 499-517, 2022, ISSN: 2673-7418.