

Modelo USLE para estimar la erosión hídrica en siete municipios de la zona andina colombiana*

USLE model to estimate water erosion in seven municipalities of the colombian andean zone

RENGIFO-RENGIFO, INGRIT-YOHANA¹; MUÑOZ-GOMEZ, FERNANDO-ANDRÉS²; TORO- TROCHEZ, OSCAR-ANDRÉS³

Historial del artículo

Recibido para evaluación: 20 de octubre de 2020

Aprobado para publicación: 1 marzo de 2022

* Título del proyecto de origen: "Fortalecimiento de los mecanismos de gestión integral del recurso suelo para la producción agrícola sostenible en el Departamento del Cauca". Financiación: Sistema General de Regalías. Culminación: 31 diciembre 2022

1 Universidad del Cauca, Facultad de Ciencias Agrarias, Ingeniera Agropecuaria. Popayán, Colombia.

2 Universidad del Cauca, Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y de la Educación, Grupo de Investigación Agroquímica. PhD Ciencias Ambientales. Popayán, Colombia. <https://orcid.org/0000-0001-5905-5266>

3 Gobernación del Cauca, Secretaria de Agricultura y Desarrollo Rural del Departamento del Cauca. Magister en Teledetección. Manizales, Colombia.

Correspondencia: famunoz@unicauca.edu.co, ringrit@unicauca.edu.co

Cómo citar este artículo: RENGIFO-RENGIFO, INGRIT-YOHANA; MUÑOZ-GOMEZ, FERNANDO-ANDRÉS; TORO- TROCHEZ, OSCAR-ANDRÉS. Modelo USLE para estimar la erosión hídrica en siete municipios de la zona andina colombiana. Revista Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial, v. 20, n. 2, 2022, p. 29-44. Doi: <https://doi.org/10.18684/rbsaa.v20.n2.2022.1738>

RESUMEN

La erosión hídrica en la zona andina colombiana se caracteriza por lluvias de alta intensidad y suelos susceptibles a la erosión por las pendientes de montaña. Igualmente, prácticas inadecuadas de manejo de suelos han incrementado los conflictos ambientales en términos de disponibilidad de áreas fértiles, o para conservación de ecosistemas. Para los proyectos de planificación territorial en el departamento del Cauca, se hace necesario conocer la magnitud de tales procesos de erosión hídrica y las potenciales pérdidas de suelo. Se propuso entonces el análisis de riesgos en siete municipios de la zona andina caucana: Almaguer, Bolívar; Cajibío, Mercaderes; Popayán, Puracé, y Santander de Quilichao. Se planteó estructurar un modelo de la Ecuación Universal de la Pérdida Suelo (USLE) calculando sus factores (A, R, K, LS, C, P). Se recolectaron datos a través del uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG) obteniendo información primaria en trabajo de campo; y secundaria, en documentación y registros oficiales. Se encontró que el desgaste de superficie está asociado a lluvias superiores a 1500 mm causando pérdidas anuales de suelo con alrededor de 973 ton/ha, cifra que es superior a la capacidad de recuperación de los sistemas naturales. Esta investigación ubica las áreas más vulnerables a la erosión hídrica, fundamental para llevar a cabo estrategias de implementación de uso y manejo del suelo como; siembra de cultivos con curvas a nivel, manejo de coberturas nobles, siembra de barreras vivas, sistemas silvopastoriles, aplicación de humus, control selectivo de arvenses, disminuir el uso de azadón y maquinaria agrícola en pendientes fuertes y el uso generalizado de herbicidas, prácticas que podrán mejorar la calidad de los cuerpos de agua y prevenir la disminución de la fertilidad de los suelos.

ABSTRACT

Hydric erosion in the Andean region of Colombia is characterized for its high intensity rains, and soils susceptible to wearing down due to steep slopes. Same way, poor practices in the use of land had increase environmental conflicts over viability of fertile areas as well as for ecosystems preservation. Considering projects of regional planning in Department of Cauca, it was necessary to know the magnitude of such erosion processes and its potential ground losses. It was then, programmed the study of risks in seven municipalities from the Andean region in Cauca: Almaguer, Bolívar; Cajibío, Mercaderes; Popayán, Puracé, and Santander de Quilichao. It was planned then, a USLE model (Universal Soil Loss Equation) calculating its factors (A, R, K, LS, C, P). Thanks to Global Information Systems (GIS) primary information was recollected on field work and also through previous official reports and documentations. I was found that hydric erosion is mainly due because of 1500 mm precipitation causing annual losses of 973 ton/ha, amount that is substantially high over land's natural system recovery capacity. Findings provide considerable knowledge for afterward land planning and soil management in Andean Regions in Colombia. This research locates the

PALABRAS CLAVE:

Zona andina; Valle interandino;
Alta montaña; Erodabilidad;
Cambio de uso de suelos.

KEYWORDS:

Andean zone; Inter-Andean
Valley; High mountains; Andic
soils; Erodability; Change of land
use.

most vulnerable areas to water erosion, essential to carry out implementation strategies for soil use and management such as; planting of crops with contour lines, management of noble covers, planting of live barriers, silvopastoral systems, application of humus, selective control of weeds, reduction of the use of hoe and agricultural machinery on steep slopes and the widespread use of herbicides, practices that will be able to improve the quality of water bodies and prevent the decrease in soil fertility.

INTRODUCCIÓN

La erosión hídrica es un proceso natural que afecta los paisajes agrícolas y geográficos, ya que las partículas del suelo se desprenden y son transportadas por las fuerzas erosivas, proceso que se manifiesta como un desplazamiento acelerado de la capa superficial del suelo que puede afectar negativamente la fertilidad del mismo, facilitar el transporte de nutrientes y el desarrollo de cuerpos de agua contaminados por nutrientes, microorganismos y tóxicos (Metales pesados) (Lee *et al.*, 2021). Las tasas de erosión han aumentado significativamente por actividades agrícolas insostenibles, el cambio climático y sus eventos extremos de lluvia y altas temperaturas han provocado graves problemas de degradación del suelo y calidad del agua a nivel mundial (Scholten y Seitz, 2019; Lee *et al.*, 2021).

Según la evaluación de la Plataforma Intergubernamental de Ciencia y Política sobre Biodiversidad y Servicios de los Ecosistemas (IPBES), la degradación de la tierra afecta el bienestar de más de 3.200 millones de personas y cuesta más del 10 % del producto bruto mundial anual, por la pérdida de servicios de los ecosistemas y biodiversidad (Scholes *et al.*, 2018). Colombia presenta una degradación por erosión en el 40 % de la superficie continental e insular que corresponde a 45.379.058 ha, de las cuales el 20 % (22.821.889 ha) muestra un grado de erosión ligera, el 17 % (19.222.575 ha) una erosión moderada, el 3 % (3.063.204 ha) una erosión severa y 0,2 % (271.390 ha) una erosión muy severa, siendo la erosión laminar, la más recurrente (Instituto de Hidrología, Meteorología y estudios Ambientales, IDEAM y Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, MADS, 2015).

Los ecosistemas que han experimentado mayores impactos han sido tradicionalmente los bosques andinos y los bosques tropicales secos. En estos términos, en Colombia, el gobierno se ha comprometido a restaurar 1 millón de hectáreas de tierras degradadas para 2020 en el marco de la Iniciativa 20 × 20. Sin embargo, dados los recursos limitados y el tiempo restante para alcanzar este objetivo, se requerirá la priorización de áreas donde las intervenciones de restauración rentables se puedan implementar rápidamente (Sylvester *et al.*, 2020), ya que en Colombia es importante evaluar los impulsores de la degradación de la tierra, que están relacionados con los conflictos de uso del suelo en términos del inadecuado uso de las tierras agrícolas (sobreutilización y subutilización), conflictos que surgen cuando existe una discrepancia entre el uso actual del entorno natural y el uso recomendado que está de acuerdo con los potenciales ambientales y las restricciones de la tierra con base en la evaluación de factores ecológicos, culturales, sociales y económicos (Muñoz *et al.*, 2018; Sylvester *et al.*, 2020).

Es claro como el uso y manejo inadecuado del suelo ha generado cambios físicos, químicos y biológicos en los ecosistemas andinos de Colombia; procesos que sumados a la naturaleza de los suelos, ha causado disminución de la fertilidad y el rendimiento productivo de los mismos (Muñoz *et al.*, 2018), donde la erosión hídrica y los deslizamientos de tierra son los factores principales de degradación en las zonas laderas y se incrementan sus efectos cuando se realizan prácticas de quema y sobrepastoreo (IDEAM y MADS, 2015).

En la zona andina del departamento del Cauca se identifican tres tipos de ecosistemas, según las características altitudinales y de vegetación: Valle interandino, Subandino y Altoandino; donde se han intensificado estos procesos de erosión por las pendientes fuertes, material parental de los suelos, las características climáticas (lluvias de alta intensidad superiores a los 2000 mm anuales) y, principalmente, al uso y manejo inadecuado de los suelos (Muñoz *et al.*, 2018; Sylvester *et al.*, 2020).

Frente a este panorama, se hace necesario estimar las pérdidas de suelo por erosión hídrica ya que una reducción de la erosión contribuye a mejorar o mantener la productividad de los suelos, y así ayudar a la sostenibilidad de este recurso (Echavarría *et al.*, 2020). Para cuantificar la pérdida de suelo han proliferado gran cantidad de modelos matemáticos que varían en sus requerimientos de información e insumos, modelos que han surgido para comprender los procesos que intervienen en la erosión (Pijl *et al.*, 2020), siendo el de mayor aceptación y de más aplicación a nivel mundial es la metodología de la Ecuación Universal de la Pérdida de Suelo (USLE) determinada por Wischmeier y Smith (1978) y Alewell *et al.* (2019), la cual es totalmente empírica y calcula la erosión al multiplicar los seis factores asociados: la precipitación erosividad factor de (R), el suelo erodabilidad factor de (K), el factor de longitud de la pendiente (L), el factor de inclinación de la pendiente (S), el factor de manejo de cultivos (C) y el factor de prácticas de control de la erosión (P) (Tauta *et al.*, 2018).

Se han desarrollado muchos modelos de erosión hídrica desde la publicación de la USLE. Estos modelos varían desde deterministas, por ejemplo, el modelo Water Erosion Prediction Project (WEPP), hasta completamente empíricos, por ejemplo, Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) y el modelo agrícola de contaminación de fuentes difusas (AGNPS). Un modelo de erosión hídrica intermedia es el modelo de Morgan, Morgan y Finney (rMMF) que puede clasificarse como un modelo semi-empírico (Okoba y Sterk, 2006).

Una de las formas de modelar los procesos de erosión hídrica es la utilización de Sistema de Información Geográfica (SIG), que permite operar los diferentes factores propuestos en la USLE para facilitar un análisis más integral y localizar geográficamente las áreas más afectadas (Carvajal y Montoya, 2020).

Teniendo en cuenta el impacto ambiental que está generando la erosión en el departamento del Cauca y al desconocimiento de la cantidad de suelo que se está perdiendo por erosión hídrica, este trabajo tuvo como objetivo determinar las pérdidas de suelo generadas por erosión hídrica en ecosistemas de la zona andina colombiana, como: Santander de Quilichao y Mercaderes (Valles interandinos), Popayán, Cajibío y Bolívar (Subandinos), Puracé y Almaguer (altoandinos). Esta información servirá como herramienta para la toma de decisiones sobre el manejo y las medidas de conservación de suelo en la zona andina.

MÉTODO

La zona de estudio se ubica al Suroccidente de Colombia, en la cordillera central de los andes, departamento del Cauca (figura 1) sobre ecosistemas de Valles interandinos de los municipios de Santander de Quilichao y Mercaderes a una altura promedio de 1.119 metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m), precipitación media anual de 1.446 milímetros (mm) y temperatura de 23 grados centígrados (°C). En la parte Subandina, los municipios de Cajibío, Popayán y Bolívar a una altura promedio de 1.760 m.s.n.m, precipitación media anual de 1.763 mm, y temperatura 19 °C. Finalmente, los municipios de Puracé y Almaguer ubicados sobre la zona Altoandina con una altura media sobre el nivel del mar de 3.031 metros (m), una temperatura de 16 °C y una precipitación anual media de 1745 mm (Instituto Geográfico Agustín Codazzi, IGAC, 2016).

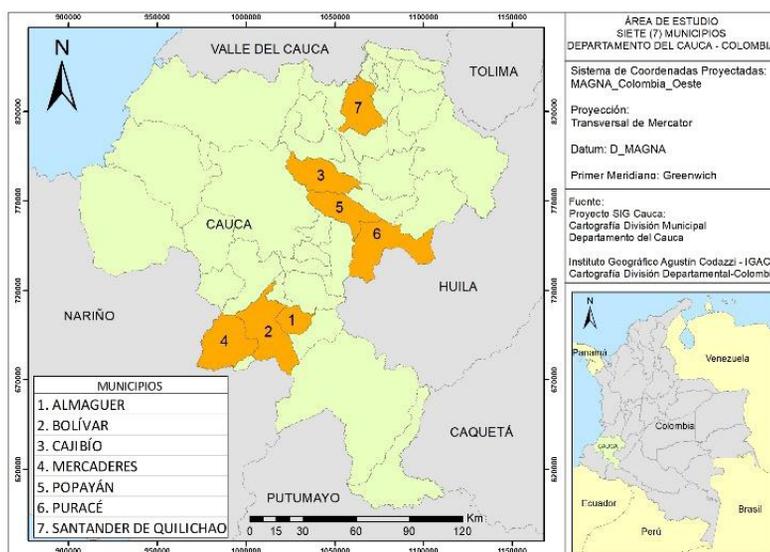


Figura 1. Zonas de estudio (subandina, altoandina y valles interandinos).

Para la determinación de las pérdidas de suelo por erosión hídrica se aplicó la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (USLE) (Ecuación 1), relacionando los factores que la integran: la pérdida media anual de suelo (A), la erosividad de las lluvias (R), la erodabilidad del suelo (K), el factor topográfico (LS), las coberturas del suelo (C) y prácticas de control a la erosión (P).

$$A = R * K * LS * C * P \tag{Ec. 1}$$

Para la operatividad de la ecuación 1 y los diferentes factores, se usó el software ArcGis 10,3 y sus diferentes herramientas que permitieron crear mapas temáticos de erosión hídrica.

Determinación de los factores de la ecuación USLE

Erosividad de la lluvia (R). Para determinar el impacto de las gotas de lluvia sobre el suelo se utilizaron los promedios de precipitación mensuales de estaciones meteorológicas influyentes en la zona de estudio, para un periodo de 35 años (1981 - 2016), información suministrada por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). Teniendo como base estos datos, se crearon archivos ráster (tamaño de celda 10 m) de precipitaciones para cada mes, utilizando el método de interpolación de distancia inversa ponderada (IDW) (extensión Spatial Analyst). Posteriormente, se determinó la precipitación media anual realizando la suma de los archivos raster de precipitaciones mensuales mediante la herramienta álgebra de mapas (Raster Calculator).

Con base en la precipitación mensual y anual, se obtuvo el Índice Modificado de Fournier (IMF) (ecuación 2), según la relación establecida por Rutebuka *et al.* (2020).

$$IMF = \sum_{i=1}^{12} \frac{P_i^2}{P_t} \tag{Ec. 2}$$

Donde:

Pi²: precipitación media mensual (mm)

Pt: precipitación media anual (mm)

Luego, se determinó la erosividad (R) mediante la expresión 3 (Rutebuka *et al.*, 2020).

$$R = 2,56 * IMF1,065 \tag{Ec. 3}$$

Los valores de erosividad fueron clasificados según Bircher *et al.* (2019) en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Valoración de la Erosividad (R).

Factor R	Grado
0 - 50	Ligero
50 - 500	Moderado
500 - 1000	Alto
>1000	Muy alto

Erodabilidad del suelo (K). Este factor representa la susceptibilidad del suelo a desintegrarse a causa de las gotas de lluvia. Se determinó utilizando la capa suelos del Cauca (IGAC, 2009), aplicando la relación de Zhang *et al.* (2019) con la ecuación 4.

$$K_{USLE} = 0,1317 * f_{csand} * f_{cl-si} * f_{orgc} * f_{hisand} \tag{Ec. 4}$$

f_{csand}: valor K para suelos con alto contenido de arena gruesa

f_(cl-si): valor K para suelos con altas proporciones de arcilla - limo

f_{orgc}: valor K para suelos con alto contenido de materia orgánica

f_{hisand}: valor K para suelos con alto contenido de arena

Cada uno de estos parámetros se determinó de la siguiente manera (Ecuaciones 5, 6, 7 y 8):

$$f_{csand} = \left(0,2 + 0,3 * \exp \left[- 0,256 * m_s * \left(1 - \frac{m_{silt}}{100} \right) \right] \right) \tag{Ec. 5}$$

$$f_{cl-si} = \left(\frac{m_{silt}}{m_c + m_{silt}} \right)^{0,3} \tag{Ec. 6}$$

$$f_{orgc} = \left(1 - \frac{0,25 * OrgC}{orgC + \exp \exp [3,72 - 2,95 * orgC]} \right) \tag{Ec. 7}$$

$$f_{hisand} = \left(1 - \frac{0,7 * \left(1 - \frac{m_s}{100} \right)}{\left(1 - \frac{m_s}{100} \right) + \exp \exp \left[-5,51 + 22,9 * \left(1 - \frac{m_s}{100} \right) \right]} \right) \tag{Ec. 8}$$

Donde:

Ms: es el contenido [%] de la fracción de arena (0,05-2,00 mm de diámetro)

Msilt: el contenido [%] de la fracción de limo (0,002-0,05 mm de diámetro)

Mc: el contenido [%] de la fracción de arcilla (<0,002 mm de diámetro)

OrgC: el contenido [%] de carbono orgánico

Posteriormente, los valores de erodabilidad (K) hallados fueron clasificados según Pérez *et al.* (2019) en el cuadro 2.

Cuadro 2. Valores de K según las texturas.

Textura	K	Grado	Motivo
Finas (alto contenido de arcilla)	0,05 - 0,15	Bajo	Resistencia al desprendimiento
Gruesas (arenosos)	0,15 - 0,20	Bajo	Escaso escurrimiento
Medias (francos)	0,25 - 0,45	Moderado	Moderada susceptibilidad al escurrimiento
Limosas (alto contenido de limo)	0,45 - 0,65	Alto	Susceptibilidad a la erosión (encostramiento y alto escurrimiento)

Longitud y pendiente del terreno (LS). Este factor está integrado por el desnivel del terreno (S) y su longitud (L). Para su determinación se utilizó el Modelo Digital de Elevación (DEM), con imágenes de radar del satélite ALOS PALSAR (2006–2011), de la Agencia Japonesa de Exploración Aeroespacial (JAXA) con resolución espacial de 12,5 m. Se realizó un remuestreo para cambiar el tamaño del píxel a 10 m, estandarizar las magnitudes espaciales del raster con los demás factores y poder procesar sus cálculos en la herramienta de álgebra de mapas (Raster calculator).

Factor L. Para el cálculo del factor L, se aplicó un relleno al DEM para evitar vacíos en el raster, con la herramienta "Fill". Posteriormente, se calculó la pendiente (β) (ecuación 9) con la herramienta Slope, la cual generó un mapa de pendientes.

$$L_{(i,j)} = \frac{(A_{(i,j)} + D^2)^{m+1} - A_{(i,j)}^{m+1}}{X^m * D^{m+2} * (22,13)^m} \quad (\text{Ec. 9})$$

Donde:

A: acumulación del flujo a nivel del píxel

D: es el tamaño del píxel (10 m)

X: es el coeficiente de forma (1 para sistemas pixelados)

Teniendo en cuenta la ecuación planteada por Bircher *et al.* (2019) (ecuación 10):

$$L = \left(\frac{\lambda}{22,13} \right)^m \quad (\text{Ec. 10})$$

Donde:

λ : es la longitud de la pendiente, en metros

m: es el exponente influenciado por la longitud y grado de la pendiente, y 22,13 es la longitud de una parcela unitaria

El exponente m se calculó mediante la ecuación 11:

$$m = \frac{F}{(1 + F)} \tag{Ec. 11}$$

El valor de F se determinó con la ecuación 12:

$$F = \frac{\sin \sin \beta / 0,00896}{3(\sin \sin \beta)^{0,8} + 0,56} \tag{Ec. 12}$$

Donde:

β : es el ángulo de la pendiente que deberá ser transformado de grados a radianes (1 grado sexagesimal = 0,01745)

Factor S. El factor S se determinó aplicando las relaciones de Kinnell y Yu (2020) con las ecuaciones 13 y 14.

$$\tan \tan \beta_{(i,j)} < 0,09 \quad S_{(i,j)} = \{10,8 \sin \sin \beta_{(i,j)} + 0,03\} \tag{Ec. 13}$$

$$\tan \tan \beta_{(i,j)} \geq 0,09 \quad \{16,8 \sin \sin \beta_{(i,j)} + 0,05\} \tag{Ec. 14}$$

Donde:

S: factor de inclinación de la pendiente

β : es el ángulo de la pendiente que fue transformado de grados a radianes (1 grado sexagesimal = 0,01745).

Los valores del factor LS obtenidos fueron clasificados según Lu *et al.* (2020) en el cuadro 3.

Cuadro 3. Clasificación del factor topográfico (LS).

Clase	Valor	Clasificación del factor LS
1	< 1,5	Muy bajo
2	1,6 – 3	Bajo
3	3 – 5	Moderado
4	5,1 – 7	Alto
5	>7	Muy alto

Factor de coberturas (C). El factor C se obtuvo a partir de un mapa de coberturas de la tierra en formato shapefile (.shp) proporcionado por la Corporación Regional del Cauca (CRC), y actualizado con imágenes Satelitales Landsat 8 para el año 2018, a escala 1:45000.

Los índices del factor C para cada cobertura se valoraron según Pacheco *et al.* (2019), tal como se aprecia en el cuadro 4.

Cuadro 4. Valores de cobertura vegetal (C).

Tipo de Cubierta	Factor C
Afloramientos rocosos	0,25
Arbustos	0,25
Bosque de galería y/o ripario	0,09
Bosque denso	0,001
Herbazal	0,01
Lagunas, Lagos y ciénagas naturales	0,001
Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	0,003
Mosaico de pastos con espacios naturales	0,003
Mosaico de pastos y cultivos	0,003
Mosaico de cultivos	0,25
Pastos enmalezados o enrastrados	0,6
Pastos limpios	0,01
Red vial, ferroviarias y terrenos asociados	0,001
Ríos (50 m)	0,001
Tejido urbano continuo	0,001
Tierras desnudas o degradadas	1
Zonas glaciares y nivales	0,25

Factor de conservación de suelo (P). Este factor representa la reducción de las pérdidas de suelo cuando se emplean las técnicas de conservación, en comparación con las que ocurrirían si no se aplica. Los valores para P (cuadro 5), se determinaron teniendo en cuenta la metodología de Pacheco *et al.* (2019).

Cuadro 5. Clasificación del factor P según el tipo de cubierta.

Clases de cobertura	Cobertura Puracé	Factor P
Tierra agrícola	Herbazal, mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales, mosaico de pastos con espacios naturales, mosaico de pastos y cultivos, mosaico de cultivos, arbustos.	0,4
Terreno edificable/ Tierra baldía	Pastos enmalezados o enrastrados, pastos limpios, red vial, ferroviarias y terrenos asociados, tejido urbano continuo, tierras desnudas o degradadas, afloramientos rocosos, zonas glaciares o nivales.	1
Área arbolada	Bosque de galería y/o ripario, Bosque denso.	0,1
Cuerpos de agua	Ríos, Lagunas, Lagos y ciénagas naturales.	0,5

Factor de pérdidas de suelo (A). La pérdida de suelo por erosión hídrica se obtuvo al multiplicar las capas de información rasterizadas, según la ecuación 1 ajustada para el departamento del Cauca.

Los valores de pérdidas de suelo se clasificaron (cuadro 6) según la metodología de 21 FAO – PNUMA – Unesco (1980), de la siguiente forma:

Cuadro 6. Clasificación de la degradación de suelos.

Pérdida de suelos (t/ha/año)	Nivel de degradación
< 10	Ninguna o ligera
10 – 50	Moderada
50 – 100	Acusada
100 – 200	Alta
>200	Muy alta

RESULTADOS

El análisis de los diferentes componentes de la erosión hídrica permitió identificar las pérdidas de suelo que se están generando en los siete municipios Cuadro 7, posteriormente se realiza el análisis y discusión de cada variable:

Cuadro 7. Erosión hídrica en la zona de estudio.

Zona	Municipios	USLE					
		R	K	LS	C	P	A
Valle interandino	Mercaderes	394-668	0,001-0,011	0,03-3424	0,001-1	0,1-1	3-973
	Santander de Quilichao	596-957	0-0,01	0,03-724	0,001-1	0,1-1	1,1-2,6
Subandina	Popayán	575-1160	0,003-0,01	0,03-8730	0,001-1	0,1-1	1,4-9,5
	Cajibío	739-1266	0,003-0,01	0,03-2171	0,001-1	0,1-1	2-8,6
	Bolívar	478 -716	0,01-0,019	0,03-3585	0,001-1	0,1-1	0-264
Altoandino	Almaguer	414-575	0-0,01	0,03-3585	0,001-1	0,1-1	0-1,2
	Puracé	349-1231	0,004-0,011	0,03-10197	0,001-1	0,1-1	2,9-190

Erodabilidad del suelo (R)

Teniendo en cuenta la clasificación en la zona de Valles interandinos, el 52 % del municipio de Mercaderes y la superficie total de Santander de Quilichao presentaron un alto grado de erosividad de las lluvias, nivel asociado a precipitaciones promedio anuales mayores a 1.400 mm y menores a 2.400 mm, en estas zonas las lluvias tienen alto poder erosivo sobre el suelo.

Para la zona Subandina, el municipio de Popayán presentó un grado de erosividad alta en la totalidad de la superficie, al igual que en el 75 % de Cajibío y el 98 % de Bolívar. Por otro lado, el 25 % de Cajibío presentó un grado muy alto, al igual que el 2 % de Bolívar, valores relacionados con precipitaciones entre 1.600 y 3.500 mm.

En la zona Altoandina, Puracé presentó un alto grado de erosividad en el 80 % de su superficie, al igual que en el 24 % de Almaguer, presentando lluvias entre 1.400 y 3.100 mm.

El valor del factor R generó grados de erosividad moderado, alto y muy alto para promedios de precipitación anuales de 35 años (1981–2016), a diferencia del estudio de Prado *et al.*, (2017) que considera sólo las tormentas en las cuales hubo escurrimientos y sus valores fueron 1154,9 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ año⁻¹.

Erodabilidad (K)

Teniendo en cuenta que los valores de este factor corresponden a las texturas medias de los tipos de suelos encontrados en la zona de estudio en términos de contenidos de arenas, limo, arcilla y carbono orgánico, según

la clasificación de IGAC, (2016), tanto en Valles interandinos, zona Subandina y Altoandina, se presentó un grado de erodabilidad bajo y, por ende, una adecuada resistencia al desprendimiento.

La zona Subandina presenta los siguientes tipos de suelos (IGAC, 2016): andisoles: que han recibido aportes significativos de ceniza volcánica y poseen menos del 25 % de carbono orgánico, inceptisoles: tienen baja a moderada evolución pedogenética, con perfiles del tipo A-B-C, A-B o A-C diferenciados por mineralización de la materia orgánica, la liberación y oxidación del hierro y la formación de estructura, oxisoles: con una evolución pedogenética muy alta, morfológicamente presentan perfiles con horizontes tipo A-Bo-C o A-Bto-C, molisoles: presentan perfiles con horizontes genéticos A-B-C o A-C y se han desarrollado a partir de materiales ricos en elementos básicos, este orden incluye los suelos que tienen un epipedón mólico y endopedón cámbico o solamente epipedón mólico, entisoles: sus materiales parentales tienen escasa evolución pedogenética debido a los materiales parentales inertes.

Los Valles interandinos presentan suelos en su mayoría entisoles, además de andisoles, oxisoles, molisoles y ultisoles que se caracterizan por poseer escasa evolución de su material parental a excepción de los ultisoles.

La zona Altoandina, presenta suelos del orden andisoles, inceptisoles, histosoles y entisoles, estos suelos cuentan con gran cantidad de materiales orgánicos especialmente en estas zonas de vida muy húmeda y con alta influencia de ceniza volcánica. En general, se han desarrollado a partir de materiales orgánicos de poco a moderado estado de evolución (IGAC, 2009).

Los resultados permitieron clasificar la erodabilidad del suelo de forma general como como baja ($0,001$ a $0,011$ t/ha/MJ⁻¹.mm⁻¹ ha⁻¹) semejante a la presentada por Prado *et al.* (2017) que fue de $0,107$ para una zona de México.

Factor topográfico (LS)

Los valores de este factor en valles interandinos presentan un grado alto y muy alto en el 14,3 % de la superficie Mercaderes y en el 6,3 % de Santander de Quilichao. Este factor para la zona Subandina presentó un grado alto y muy alto en el 9,7 % de la superficie de Cajibío, al igual que en el 23,8 % de Bolívar.

En la zona Altoandina, el municipio de Puracé, el 15 % de la superficie está afectado en un grado alto y muy alto, al igual que en el 33 % de Almaguer. Lo anterior se asocia a pendiente escarpadas (50-75 %) y fuertemente escarpadas (>75 %) presentes en la zona de estudio.

Factor de coberturas vegetales (C)

Los valores para este factor en todas las zonas fluctuaron entre $0,001$ y 1 : según Pacheco *et al.* (2019) estos valores hacen referencia a la influencia de las coberturas en la pérdida de suelo, siendo 1 el valor de las coberturas que tienen mayor relación en la pérdida de suelo y viceversa. En Valles interandinos, específicamente en Mercaderes y Santander, las coberturas predominantes son herbazal, pastos limpios, bosque seco tropical de galería y/o ripario, mosaico de cultivos, pastos enmalezados o enrastrados y cultivos transitorios. Los valores de C más altos representan coberturas asociadas a procesos de erosión debido a su poco anclaje al suelo, dentro de estas coberturas están los pastos enmalezados o enrastrados, pastos limpios, arbustos y cultivos transitorios.

Para la zona Subandina, las coberturas más representativas fueron bosques andinos de galería y/o ripario, mosaico de pastos y cultivos, pastos limpios, pastos enmalezados o enrastrados, plantación forestal y bosque denso. Los valores más elevados y que están asociados a procesos de erosión se presentaron en zonas con coberturas de pastos enmalezados o enrastrados, plantaciones forestales y tierras desnudas o degradadas.

En la zona Altoandina, las coberturas más dominantes son mosaico de pastos y cultivos, arbustos, pastos limpios, pastos enmalezados y enrastrados, bosque altoandino denso, herbazal y bosque de galería y/o ripario. Los valores de C más altos se presentaron para coberturas asociadas a procesos de erosión, en zonas con arbustos, mosaico de cultivos, pastos enmalezados o enrastrados.

Prácticas de control a la erosión (P)

Los valores de este factor en todas las zonas estuvieron entre 0,1 y 1: según Martínez *et al.* (2020), miden la pérdida de suelo ante la aplicación de una determinada práctica de control de la erosión, en donde los valores más cercanos a 1 representan la ausencia de prácticas de control y los más cercanos a 0,1 se relacionan a prácticas de control asociadas a la cobertura. En este trabajo los valores más altos se relacionan con terrenos edificables o tierras baldías.

En Valles interandinos, el municipio de Mercaderes presentó el valor más alto de este factor en 11.569 ha de la superficie, se caracterizó por presentar zonas con pastos enmalezados o enrastrados, pastos limpios, tejido urbano continuo y discontinuo. Por su parte, el municipio de Santander presentó el valor más alto en 21.745 ha, en zonas con pastos enmalezados o enrastrados, pastos limpios, red vial, ferroviarias y terrenos asociados, tejido urbano continuo, zonas industriales o comerciales, zonas verdes urbanas e instalaciones recreativas. Una de las alternativas de control de la erosión en Valles interandinos consiste en practicar la labranza mínima para combatir eficientemente las arvenses y además, examinar su potencial forrajero, así como cobertura y protección del suelo.

En la zona Subandina, Popayán presentó 18.824 ha, caracterizadas por la presencia de pastos enmalezados o enrastrados, pastos limpios, tierras desnudas o degradadas, red vial, ferrocarriles y terrenos asociados, tejido urbano continuo, zonas industriales o comerciales. En Cajibío 17.212 ha presentaron el mayor valor, en zonas con presencia de pastos enmalezados o enrastrados, pastos limpios, tejido urbano continuo y tierras desnudas o degradadas. Para el municipio de Bolívar, 5.895 ha del territorio presenta zonas con tierras desnudas o degradadas, red vial, ferroviarias y terrenos asociados, tejido urbano continuo, zonas quemadas, pastos enmalezados o enrastrados, pastos limpios y zonas arenosas naturales. En esta zona el control de la erosión se realiza mediante el uso cubiertas superficiales vegetales en el suelo, tienen la función de proteger el suelo de las gotas de lluvia, disminuir la escorrentía e impedir el arrastre de sedimentos.

En la zona Altoandina, el municipio de Puracé presentó el valor más alto en 11.838 ha, en zonas de pastos enmalezados o enrastrados, pastos limpios, red vial, ferroviarias y terrenos asociados, tejido urbano continuo, tierras desnudas o degradadas, zonas glaciares o nivales. En Almaguer 4.111 ha, se presentaron zonas de pastos enmalezados o enrastrados, pastos limpios y zonas quemadas y se realiza control de erosión con aplicaciones de compuestos orgánicos y minerales, además, de la construcción de canales a curvas a nivel, con el fin de disminuir la escorrentía, retener sedimentos, aumentar la infiltración de agua en el suelo.

Pérdida media anual de suelo (A)

En Valles interandinos, la erosión hídrica del suelo fue moderada en el 2 % del municipio de Mercaderes, con pérdidas entre 10 y 50 ton/ha/año, al igual que en 15,3 % de la superficie de Santander de Quilichao. En la zona Subandina se presentó erosión moderada en el 7 % de la superficie de Popayán, en el 10,5 % de Cajibío y en el 4 % del municipio de Bolívar.

Por su parte, la zona de Altoandina presentó una erosión moderada en el 2 % del municipio de Puracé y en el 2,55 % de Almaguer. Al acudir a estudios realizados por Quintero *et al.* (2017) sobre la determinación de la erosión potencial (EP) en el Quindío, se pudo evidenciar una pérdida de suelo moderada (hasta 50 ton/ha/año) en el 21 % del área del municipio con una posible pérdida de espesor del suelo considerable. Es importante mencionar que el espesor del suelo que se puede perder por cada 30 ton/ha/año es de 2 a 3 mm,

por tanto, los datos encontrados en el presente estudio son indicadores para la toma de decisiones a la hora de implementar prácticas de conservación en estas áreas. Estudios realizados por Hincapié y Ramírez (2009) en 11 municipios del departamento de Caldas, demostraron que el 90 % del área de estudio es susceptible a pérdidas potenciales del suelo superiores a 25 ton/ha/año, además de un riesgo moderado de pérdida de profundidad del primer horizonte.

La espacialización de los procesos de erosión hídrica para los siete municipios se observa en la Figura 2, donde se visualiza el nivel de afectación que tienen los suelos por la pérdida de suelo.

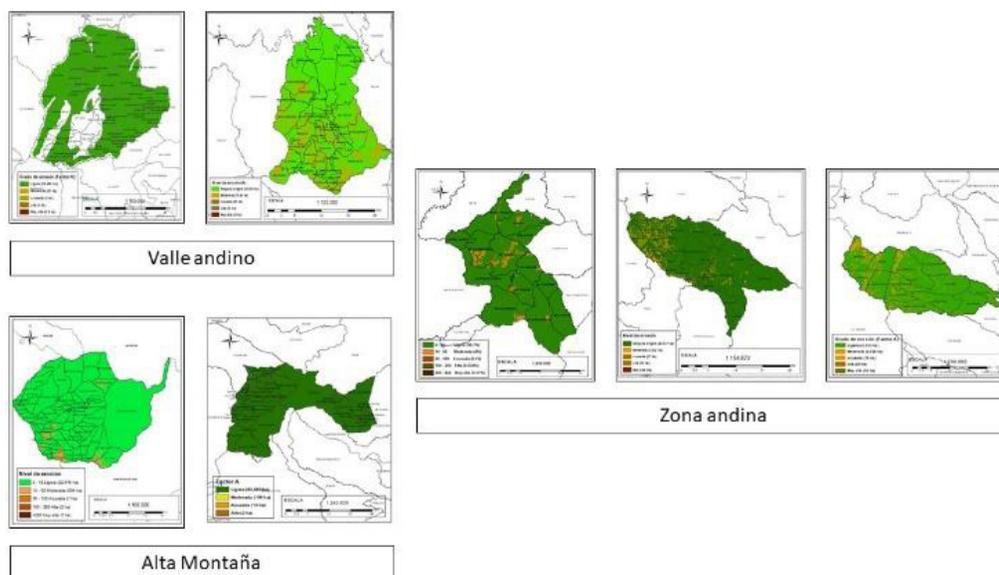


Figura 2. Erosión hídrica en la zona de estudio

CONCLUSIONES

Los resultados del modelo permitieron una comprensión más clara de la erosión hídrica en los suelos andinos y cómo está directamente relacionada con el cambio de uso y manejo del suelo, generando una alta susceptibilidad a la erosión hídrica en la zona andina colombiana. Los factores que más incrementan la pérdida de suelo y nutrientes son las altas intensidades de lluvia (superiores a 1500 mm), la longitud y grados de inclinación de las pendientes para las condiciones actuales.

El uso inadecuado del suelo en la zona andina ha reducido la cobertura vegetal natural, incrementado los procesos de erosión que reducen la infiltración y aumenta el escurrimiento. Para disminuir el efecto de estos procesos es recomendable el trazado y siembra de cultivos con curvas a nivel, manejo de coberturas nobles (maní forrajero), siembra de barreras vivas, sistemas silvopastoriles, ganadería de rotación, aplicación de humus al suelo, control selectivo de arvenses, además, evitar el uso de azadón y maquinaria agrícola en pendientes fuertes y el uso generalizado de herbicidas, con ello se evita la formación de calvas, surcos profundos, terrazas y cárcavas en el terreno. Además, para el control de movimientos masales en la zona andina se recomienda

la siembra de vegetación de sistema radical profundo como Nacedero (*Trichanthera gigantea*), Matarratón (*Glicedea sepium*) y Caña brava (*Gynerium sagittatum*), entre otras.

Esta investigación ubica las áreas más vulnerables a la erosión hídrica, que son fundamentales para estrategias de implementación de uso y manejo del suelo que podrán mejorar la calidad de los cuerpos de agua y prevenir la disminución de la fertilidad de los suelos. Así mismo, puede ayudar a los municipios y partes interesadas a gestionar de manera más sostenible con la utilización de entornos SIG e información primaria y de esta forma implementar distintas acciones para la conservación del suelo, con el fin de darle un buen uso, lo que requerirá de optimizar las actividades agropecuarias, controlar la tala indiscriminada de los bosques y aplicar intervenciones normativas sobre los usos del suelo a través de instrumentos de ordenamiento ecológico del territorio.

AGRADECIMIENTOS

Gobernación del Cauca; proyecto: "Fortalecimiento de los mecanismos de gestión integral del recurso suelo para la producción agrícola sostenible en el departamento del Cauca"; Universidad del Cauca.

REFERENCIAS

- ALEWELL, CHRISTINE; BORRELLI, PASQUALE; MEUSBURGER, KATRIN; PANAGOS PANOS. Usando el USLE: Probabilidades, desafíos y limitaciones del modelado de la erosión del suelo. *Investigación Internacional de Conservación de Suelos y Aguas*, v. 7, n. 3, 2019, p. 203-225.
<https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2019.05.004>
- BIRCHER, P.; LINIGER, H.P.; PRASUHN, V. Comparing different multiple flow algorithms to calculate RUSLE factors of slope length (L) and slope steepness (S) in Switzerland. *Geomorphology*, v.346, n. 106850, 2019.
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.106850>
- CARVAJAL-AGUIRRE, LUISA.; MONTOYA-GOMEZ, M. Modelación espacial de los factores de erosión en la cuenca del río El Hato, a partir del uso de sistemas de información geográfica [Tesis Ingeniería informática]. Medellín (Colombia): Universidad de Antioquia, Facultad de ingenierías Escuela Ambiental, 2020, 45 p.
http://repositorio.udea.edu.co/bitstream/10495/15602/4/CarvajalLuisa_2020_ModelacionEspacialErosion.pdf [Consultado enero de 2021].
- COLOMBIA. INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES (IDEAM); MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE (MADS). Estudio nacional de la degradación de suelos por erosión en Colombia. Bogotá (Colombia): 2015, 20 p. <http://documentacion.ideam.gov.co/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=38114> [Consultado diciembre de 2020]
- COLOMBIA. INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI (IGAC). Estudio general de suelos y zonificación de tierras del Cauca, Subdirección de Agrología del Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Bogotá (Colombia) : 2009, 20 p.
- COLOMBIA. INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTIN CODAZZI (IGAC). Suelos y tierras de Colombia, Subdirección de Agrología del Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Bogotá (Colombia): 2016, 25 p.
- ECHAVARRÍA-CHÁIREZ, F.G.; MEDINA-GARCÍA, G.; RUIZ-CORRAL, J. A. Efecto en la erosión hídrica del suelo en pastizales y otros tipos de vegetación por cambios en el patrón de lluvias por el calentamiento global en Zacatecas. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, v. 11, 2020, p. 63-74.
<https://doi.org/10.22319/rmcp.v11s2.4694>
- KINNELL, P.I.A.; YU, B. CLIGEN as a weather generator for predicting rainfall erosion using USLE based modelling systems. *CATENA*, v. 194, 2020, e 104745. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104745>

- LEE, S.; CHU, M. L.; GUZMAN, J.A.; BOTERO-ACOSTA, A. A comprehensive modeling framework to evaluate soil erosion by water and tillage. *Journal of Environmental Management*, v. 279, 2021, e 111631.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111631>
- LU, S.; LIU, B.; HU, Y.; FU, S.; CAO, Q.; SHI, Y.; HUANG, T. Soil erosion topographic factor (LS): Accuracy calculated from different data sources. *CATENA*, v. 187, 2021, e 104334.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104334>
- MARTÍNEZ-MENA, M.; CARRILLO-LÓPEZ, E.; BOIX-FAYOS, C.; ALMAGRO, M.; GARCÍA FRANCO, N.; DÍAZ-PEREIRA, E. Long-term effectiveness of sustainable land management practices to control runoff, soil erosion, and nutrient loss and the role of rainfall intensity in Mediterranean rainfed agroecosystems. *CATENA*, v. 187, 2020, e 104352.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104352>
- MUÑOZ, G.F.A.; GALICIA, S.L.; PÉREZ, E.H. Agricultura migratoria conductor del cambio de uso del suelo de ecosistemas alto andinos de Colombia. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, v. 16, n. 1, 2018, p. 15-25 h.
http://dx.doi.org/10.18684/bsaa.v16n1.630_
- OKOBA, B.O.; STERK, G. Farmers' identification of erosion indicators and related erosion damage in the Central Highlands of Kenya. *Catena*, v. 65, n. 3, 2006, p. 292-301.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2005.12.004>
- PACHECO, H.A.; CEVALLOS, R.X.; VINCES, C.J. Cálculo del factor C de la RUSLE, en la cuenca del río Carache, Trujillo-Venezuela usando imágenes del Satélite Miranda VRSS. *Revista ESPACIOS*, v. 40, n. 3, 2019.
<http://www.revistaespacios.com/a19v40n03/19400306.html> [Consultado diciembre de 2020].
- PÉREZ-SALINAS, J.E.; RODRÍGUEZ, F.R.; LÓPEZ-SANTOS, A.; TORRES-GONZÁLEZ, J.A.; MERAZ-JIMÉNEZ, A. DE J.; DÍAZ-ROMO, A.; VALDIVIA-MARTÍNEZ, O. Erodabilidad y riesgo de erosión de suelos negros del centro de México: estudio de un Phaozem. *Terra Latinoamericana*, v. 37, n.4, 2019, p. 391-400.
<https://doi.org/10.28940/terra.v37i4.531>
- PIJL, A.; REUTER, L.E.H.; QUARELLA, E.; VOGEL, T.A.; TAROLLI, P. GIS-based soil erosion modelling under various steep-slope vineyard practices. *CATENA*, v. 193, 2020, e104604.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104604>
- PRADO-HERNÁNDEZ, J.V.; RIVERA-RUIZ, P.; LEÓN-MOJARRO, B.; CARRILLO-GARCÍA, M.; MARTÍNEZ-RUIZ, A. Calibración de los modelos de pérdidas de suelo usle y musle en una cuenca forestal de México: Caso El Malacate. *Agrociencia*, v. 51, n. 3, 2017, p. 265-284.
http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1405-31952017000300265&script=sci_arttext [Consultado noviembre de 2020]
- QUINTERO, A.F.C.; SALAZAR, L.A.L.; MELO, O.R. Determinación del riesgo a la erosión potencial hídrica en la zona cafetera del Quindío, Colombia. *Revista de investigación agraria y ambiental*, v. 8, n. 1, 2017, p. 17-26.
https://doi.org/10.22490/21456453.1828_
- RAMÍREZ, F.A.; HINCAPIÉ, E. Riesgo a la erosión en la zona cafetera central del departamento de Caldas. *CENICAFÉ*, v. 60, n. 2, 2009, p. 173-189.
<https://biblioteca.cenicafe.org/handle/10778/152> [Consultado diciembre de 2020]
- RUTEBUKA, J.; TAEYE, S.; KAGABO, D.; VERDOODT, A. Calibration and validation of rainfall erosivity estimators for application in Rwanda. *CATENA*, v. 190, 2020, e 104538.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104538>
- SCHOLES, R.; MONTANARELLA, L.; BRAINICH, E.; BARGER, N. Summary for policymakers of the assessment report on land degradation and restoration of the Intergovernmental Science-Policy Platform on. 1, 2018, 46 p, ISBN 978-3-947851-04-1. https://www.fs.fed.us/research/publications/misc/94550_2018_scholes.pdf [Consultado noviembre de 2020]
- SCHOLTEN, T.; SEITZ, S. Soil Erosion and Land Degradation. *Soil Systems*, v. 3, n. 4, 2019, 68 p.
<https://doi.org/10.3390/soilsystems3040068>

- SIAVOSH, S.; RIVERA, JUAN-MANUEL; GÓMEZ, MARÍA-ELENA. Agroforestería para la Producción Animal en Latinoamérica Impacto de sistemas de ganadería sobre las características físicas, químicas y biológicas de suelos en los Andes de Colombia efecto de la ganadería sobre las características del suelo. Agroforestería para la Producción Animal en Latinoamérica, v. 77, n. 95. 2000.
<https://www.fao.org/ag/AGa/AGAP/FRG/AGROFOR1/siavosh6.pdf> [Consultado enero de 2021].
- SYLVESTER, J.; VALENCIA, J.; VERCHOT, L.V.; CHIRINDA, N.; ROMERO-SANCHEZ, M.A.; QUINTERO, M.; CASTRO-NUNEZ, A. A rapid approach for informing the prioritization of degraded agricultural lands for ecological recovery: A case study for Colombia. Journal for Nature Conservation, v. 58, 2020, e 125921.
<https://doi.org/10.1016/j.jnc.2020.125921>
- TAUTA-MUÑOZ, J. L.; CAMACHO-TAMAYO, J.H.; RODRÍGUEZ-BORRAY, G.A. Estimación de erosión potencial bajo dos sistemas de corte de caña panelera utilizando la ecuación universal de pérdida de suelos. Revista UDCA Actualidad & Divulgación Científica, v. 21, n. 2, 2018, p . 405-413.
<https://doi.org/10.31910/rudca.v21.n2.2018.1074>
- ZHANG, K.; YU, Y.; DONG, J.; YANG, Q.; XU, X. Adapting & testing use of USLE K factor for agricultural soils in China. Agriculture, Ecosystems & Environment, v. 269, 2019, p. 148-155.
<https://doi.org/10.1016/j.agee.2018.09.033>