

APPLICATION OF THE RUSLE MODEL TO CALCULATE SOIL WATER EROSION IN THE LOWER BASIN OF THE VIRÚ RIVER, LA LIBERTAD REGION, 2022

Carrión Tapullima, José Luis¹ , Zapata Abad, Abel Emilio¹ , Jessica Marleny Luján Rojas, Magister¹ , Fernando Ugaz Odar, Doctor¹ .

¹Universidad Privada del Norte, Perú, N00061393@upn.pe

¹Universidad Privada del Norte, Perú, N00163503@upn.pe

¹Universidad Privada del Norte, Perú, jessica.lujan@upn.pe

¹Universidad Privada del Norte, Perú, ferugaz@hotmail.com

abstract- Soil degradation is a serious threat to agroecosystems and landscapes in many countries. These processes are intensified much more during episodic high-intensity rainfall events over cultivated areas. The need to estimate soil loss at a variety of spatial and temporal scales has been recognized. Therefore, as an alternative to the difficulty of controlling soil loss due to water erosion, a mathematical method is developed. The objective of this research is to apply the RUSLE model to calculate soil water erosion, obtaining an average erosion of 57.14 T.ha⁻¹.año⁻¹ in the lower basin of the Virú River, La Libertad Region, 2022, which discharges into the Pacific Ocean.

Keywords: Water erosion, RUSLE, soil, basin, degradation.

APLICACIÓN DEL MODELO RUSLE PARA CALCULAR LA EROSIÓN HÍDRICA DEL SUELO EN LA CUENCA BAJA DEL RÍO VIRÚ, REGIÓN LA LIBERTAD, 2022

APPLICATION OF THE RUSLE MODEL TO CALCULATE SOIL WATER EROSION IN THE LOWER BASIN OF THE VIRÚ RIVER, LA LIBERTAD REGION, 2022

Carrión Tapullima, José Luis¹ , Zapata Abad, Abel Emilio¹ , Jessica Marleny Luján Rojas, Magister¹ , Fernando Ugaz Odar, Doctor¹ .

¹Universidad Privada del Norte, Perú, N00061393@upn.pe

¹Universidad Privada del Norte, Perú, N00163503@upn.pe

¹Universidad Privada del Norte, Perú, jessica.lujan@upn.pe

¹Universidad Privada del Norte, Perú, ferugaz@hotmail.com

Resumen- *La degradación del suelo es una grave amenaza para los agroecosistemas y paisajes de muchos países. Estos procesos se intensifican mucho más en lluvias episódicas de alta intensidad sobre áreas de cultivo. Se ha reconocido la necesidad de estimar la pérdida de suelo en una variedad de escalas espaciales y temporales, por ello, debido a la dificultad que presenta para el control de pérdida del suelo por la erosión hídrica, como alternativa se desarrolla un método matemático, siendo así el objetivo del presente trabajo de investigación, aplicación del modelo RUSLE para calcular la erosión hídrica del suelo, obteniendo una erosión media de 57.14 T.ha⁻¹.Año⁻¹ en la cuenca baja del río Virú, Región La Libertad, 2022 que descarga al Océano Pacífico.*

Palabras clave: *Erosión hídrica, RUSLE, suelo, cuenca, degradación.*

I. INTRODUCCIÓN

En la degradación de suelos, la erosión es un proceso irreversible que afecta gran extensión del territorio y el fenómeno más significativo es la erosión hídrica. Las condiciones físicas del suelo como la textura, profundidad, porosidad, entre otras, tienen mucha importancia en este proceso. Una mayor disminución de la capacidad productiva del suelo se denomina procesos de degradación, entre los cuales uno de los más importantes es la erosión [1]. La pérdida de suelo por efectos de la erosión constituye uno de los principales problemas a nivel mundial; la erosión reduce la capacidad del suelo de retener el agua

La erosión hídrica es entendida como la remoción, transporte y deposición de partículas de suelo, materia

orgánica y nutriente soluble [2]. Se presenta con diversos grados de intensidad, llegando muchas veces hasta condiciones tales, que no es posible restaurarlas, provocando en consecuencia el desequilibrio de la estabilidad armónica a nivel de cuencas hidrográficas. [3]

América Latina es una de las regiones más ricas del mundo. Con sólo un ocho por ciento de la población mundial, tiene el 23 % de las tierras potencialmente cultivables del mundo, 12 % de la tierra actualmente cultivada, 46 % de los bosques tropicales del mundo y el 31% del agua dulce del planeta. Su principal amenaza es la erosión hídrica y deslizamientos de tierra, que son factores principales de degradación en las laderas de las montañas, especialmente cuando las tierras son quemadas o sobre pastoreadas.[4]

En Argentina, Bolivia, Brasil, Chile, Paraguay y Perú, en conjunto existen alrededor de 200 millones de hectáreas de tierras degradadas. Los procesos degradativos más difundidos son la erosión hídrica y eólica, y el deterioro químico y físico de los suelos. El Perú cuenta con 159 cuencas hidrográficas, 62 en la vertiente del Pacífico, 84 en la vertiente del Amazonas y 13 en la vertiente del lago Titicaca [5].

Perú es un país muy heterogéneo en las características de los suelos en su relación con la erosión (erodabilidad) y con la incidencia de la precipitación, la misma que fluctúa aproximadamente de 10 a 3000 mm por año, con una distribución anual irregular, siendo menor en el periodo de abril a noviembre y mayor de diciembre a marzo[2].

Digital Object Identifier: (only for full papers, inserted by LACCEI).

ISSN, ISBN: (to be inserted by LACCEI).

DO NOT REMOVE

Se ha evidenciado que la erosión hídrica es un problema que cada año va aumentando y esto se da por un mal manejo del suelo o por una mala gestión en dicha zona. Por esta razón la finalidad de la investigación es determinar la pérdida de suelo por la erosión hídrica aplicando los sistemas de información geográfica (SIG) y la ecuación universal de pérdida de suelo revisada (RUSLE) en la cuenca baja del Río Virú.

También se consideró delimitar el área de estudio en donde se realizará el modelamiento, analizar datos e información meteorológica de geo portales autorizados, generar modelo digital de elevación del área afectada por la erosión hídrica e identificar la erosión potencial del suelo.

Si bien es cierto, se conoce acerca de la erosión hídrica del suelo, no se sabe la cantidad aproximada de suelo que se pierde por año en $T.ha^{-1}.año^{-1}$, por lo tanto, a modo a responder la pregunta de la investigación, de cuánto suelo se perdió en el 2022 en la cuenca baja del Río Virú, se plantea la siguiente hipótesis: La pérdida de suelo en la cuenca baja del Río Virú se encuentra en un rango de 0 - 10 $T.ha^{-1}.año^{-1}$. Se considera que esta cuenca presenta una pérdida leve de suelo, según la clasificación de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Esta hipótesis fue puesta a prueba mediante la recolección de datos y la aplicación de modelos para la estimación de la pérdida de suelo en la cuenca.

II. METODOLOGÍA

La presente investigación es de rigor investigativo cuantitativo, En el estudio se realizó una recolección de datos en distintos años, los cuales servirán para estimar el comportamiento de la erosión hídrica del suelo, mediante procedimientos rigurosos acreditados por la comunidad científica.[6]

El diseño del estudio fue del tipo descriptivo, ya que el propósito del estudio es documentar las condiciones, actitudes o características de la población objeto de estudio sin influir sobre él de ninguna manera [7].

Como se mencionó anteriormente, a fin de determinar la relación entre las variables Erosión hídrica del suelo y modelos RUSLE, se recopilaron datos históricos de los factores que conforman la ecuación matemática para ser procesados por un sistema de información geográfica y estimar el resultado de la interacción de las variables.

El presente estudio enfoca como población al ámbito de la cuenca del Río Virú, situada específicamente en la provincia de Virú, en la región La Libertad. [8] describe como población a un grupo de personas o cosas sobre las que desea saber en un estudio.

Esta investigación se realiza mediante el método inductivo-deductivo, que según [9] Es una regla o ley general que se deriva de elementos específicos y va más allá del contenido

El tipo de análisis utilizado fue el de tipo documental, ya que consiste en evaluar las distintas indagaciones establecidas

con el objetivo de poder representar de esta manera un determinado y adecuado contenido y formas documentarias que presentan con el fin de usarlos como medios de consulta.

Para determinar la validez y la confiabilidad de los instrumentos, se utilizó la opinión y el visto bueno de profesionales expertos en el tema de la carrera profesional de ingeniería ambiental de la Universidad Privada del Norte UPN, Trujillo.

La información recopilada en la investigación se obtuvo del servicio geológico de los Estados Unidos, donde se descargaron datos satelitales Landsat 8 OLI para el año 2022. Las imágenes satelitales descargadas fueron geo-rectificadas de acuerdo con el sistema de coordenadas 17-Sur UTM. Debido al error atmosférico y la variación estacional, las imágenes satelitales de Landsat fueron corregidas atmosférica y radiométricamente mediante la herramienta Geobia, por lo tanto, garantizan que la imagen esté libre de ruido, radiométrico y atmosférico. Para la evaluación de los diferentes factores de la Ecuación RUSLE:

$$A = R \times K \times LS \times P \times C \quad (10)$$

se utilizaron diferentes metodologías de autores, donde el flujo de trabajo del presente estudio se plasma en la fig. 1

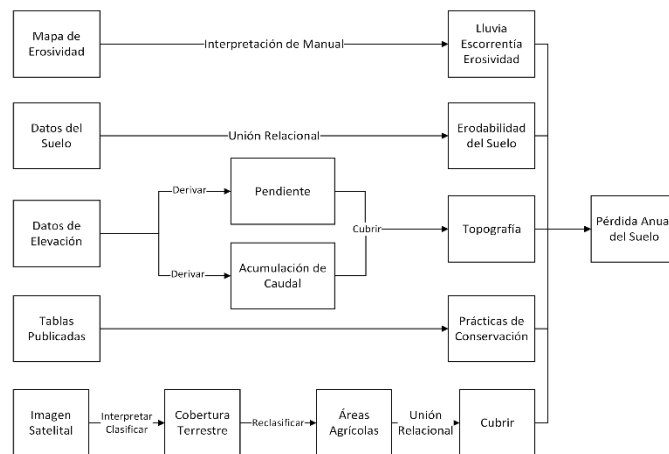


Fig.1 Diagrama de flujo de trabajo

En la actualidad existen diferentes maneras para hallar el factor R, para este caso de estudio se utilizó la relación empírica que desarrolló Wischmeier & Smith en 1978, y luego se interpola para hallar el valor del factor en toda la superficie de la Cuenca. La relación que se aplicó fue la siguiente:

Donde:

$$R = \sum_{i=1}^{12} 1.735 \times 10^{(1.5(\log_{10}(\frac{Pi^2}{P})) - 0.088188)} \quad (10)$$

R = “factor de erosividad de lluvias”
($MJ.mm.ha^{-1}.hr^{-1}.año^{-1}$)

Pi = “precipitación mensual en mm”

p = "precipitación anual en mm"

Para la determinación del factor K, se realizó un trabajo de campo en el área de estudio, con el propósito de recolectar Muestras de Suelos (MS), mediante calicatas de 25 cm de profundidad georreferenciadas en coordenadas UTM, en la zona 17 L y las MS se transportaron en bolsas plásticas herméticas hasta el laboratorio. Se recolectó un total de 16 MS, las cuales se procedió a realizar el análisis fisicoquímico, llevados a cabo en el laboratorio de Análisis Instrumental de la UPN, Trujillo.

TABLA I
PUNTOS DE MUESTREO DE LA CUENCA BAJA DEL RÍO VIRÚ

MUESTRAS	NORTE	ESTE
MUESTRA 1	9070406	749533.58
MUESTRA 2	9072358	750646.66
MUESTRA 3	9074335	753082.22
MUESTRA 4	9074244	753081.69
MUESTRA 5	9070954	748423.98
MUESTRA 6	9069933	743295.14
MUESTRA 7	9066149	737336.25
MUESTRA 8	9065147	752139.255
MUESTRA 9	9080396	744604.465
MUESTRA 10	9086586	744873.564
MUESTRA 11	9092954	740926.77
MUESTRA 12	9098247	740567.97
MUESTRA 13	9098605	737876.974
MUESTRA 14	9074386	764248.739
MUESTRA 15	9068018	758328.547
MUESTRA 16	9063353	736441.776

Luego se usó la metodología propuesta por Walkley & Black basado en la oxidación del carbono orgánico, determinando el porcentaje de materia orgánica del suelo y además se determinó la textura y permeabilidad.

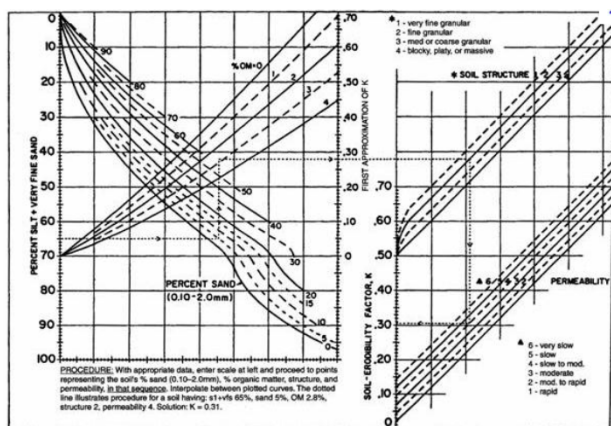


Fig.2 Nomograma para la obtención del factor K
Wischmeier y Smith 1978

Para obtener el factor C y los diversos usos del suelo de la cuenca baja del río Virú, se siguió la metodología que consiste en la determinación del índice de vegetación de diferencia

normalizada (Normalized Difference Vegetation Index - NDVI).[11] propone la siguiente ecuación para zonas tropicales:

$$C_{rA} = 0.1 \left(\frac{-NDVI+1}{2} \right) \quad (11)$$

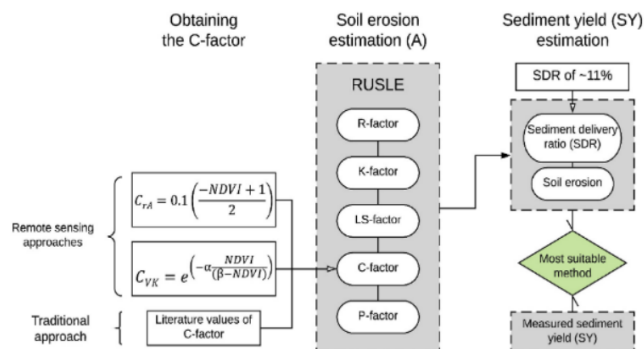


Fig.3 Diagrama de Obtención del Factor C

Se usó la fórmula propuesta por Rouse (1973) para la determinación del NDVI mediante imágenes satelitales de Landsat 8 Oli para hallar las imágenes de las diferentes etapas del año de forma independiente apoyado del software Arcgis v10.8 insertando las bandas 4 y 5 de cada uno de los paquetes del satélite.

TABLA II
NOMBRE DE LAS BANDAS DEL SATÉLITE LANDSAT 8 OLI

BANDAS	LONGITUD DE ONDA (µm)	RESOLUCIÓN (m)
Banda 1 - Aerosol costero	0.43 - 0.45	30
Banda 2 - Azul	0.45 - 0.51	30
Banda 3 - Verde	0.53 - 0.59	30
Banda 4 - Rojo	0.64 - 0.67	30
Banda 5 - Infrarrojo Cercano	0.85 - 0.88	30
Banda 6 - SWIR 1	1.57 - 1.65	30
Banda 7 - SWIR 2	2.11 - 2.29	30
Banda 8 - Pancromatico	0.50 - 0.68	15
Banda 9 - Cirrus	1.36 - 1.38	30
Banda 10 - TIRS 1	10.60 - 11.19	100
Banda 11 - TIRS 2	11.50 - 12.51	100

TABLA III
FÓRMULA DEL NDVI

ÍNDICE	FÓRMULA
NDVI	(Banda 5 – Banda 4) / (Banda 5 + Banda 4)

Por otro lado, para hallar el Factor P, teniendo en cuenta que este factor es uno de los más influyentes en cuanto a la pérdida de suelo por erosión hídrica, se utilizó el modelo de

pendientes generado para la obtención del factor LS, y se otorgó valores a las pendientes según su inclinación de 0.55 a 1 [12].

TABLA IV
FACTOR DE PRÁCTICAS DE APOYO DEL SUELO SEGÚN TIPOS DE CULTIVO Y PENDIENTES

PENDIENTE (%)	CONTORNO	CULTIVO EN LÍNEA	TERRAZAS
0 a 7	0.55	0.27	0.1
7 a 11.3	0.6	0.3	0.12
11.3 a 17.6	0.8	0.4	0.16
17.6 a 26.8	0.9	0.45	0.18
16.8	1	0.5	0.2

El factor L fue determinado mediante la siguiente formula:

$$L = \left[\frac{\lambda}{22.13} \right]^m \quad (13)$$

Donde:

L: Factor longitud de la pendiente.

λ : Longitud de la pendiente, (m)

m: Exponente influenciado por la longitud y grado de pendiente.

22.13: Valor que depende del tamaño estándar de una parcela de observación.

El exponente m se calcula como:

$$m = \frac{\beta}{1 + \beta} \quad (13)$$

El valor de β se calcula como:

$$\beta = \frac{\sin\theta / 0.0896}{3(\sin\theta)^{0.8} + 0.56} \quad (13)$$

Donde:

θ : Ángulo de la pendiente que se debe transformar a radianes

La longitud de la pendiente se calcula según Desmet y Govers (1996) citado por (Gimenez Suarez, 2008).

$$L(i,j) = \frac{(A(i,j) + D^2)^{m+1} - A(i,j)^{m+1}}{x^m \times D^{M+2} \times (22.13)^m} \quad (13)$$

Donde:

A(i,j)= es el área de contribución aguas arriba en la entrada de una celda ráster con coordenadas (i,j)

D= Resolución de celda en metros

$x_{i,j}$, ($\sin\alpha_{i,j} + \cos\alpha_{i,j}$)

$\alpha_{i,j}$: dirección de la orientación para la celda ráster de coordenadas(i,j)

El cálculo de la longitud de la pendiente de la cuenca baja del Río Virú, se trabajó con una capa ráster de la zona de estudio, es un modelo digital del terreno (DEM), en el sistema de coordenadas WGS84, Zona 17 Sur, obtenido de la página web de la NASA, ALASKA, utilizando las herramientas del software ArcGIS 10.8.

Para el Factor S determina el ángulo de la pendiente del terreno en estudio, RUSLE utiliza las siguientes fórmulas para el cálculo del factor:

$$S = (10.8 \sin \theta + 0.03) \text{ en pendientes } < 9.0\%; \text{ y} \\ S = (16.8 \sin \theta - 0.5) \text{ en pendientes } \geq 9.0\% \quad (14)$$

Donde: S: Factor de inclinación de la pendiente.

θ : Ángulo de la pendiente que debe transformarse de grados a radianes.

(13)

III. RESULTADO Y DISCUSIONES

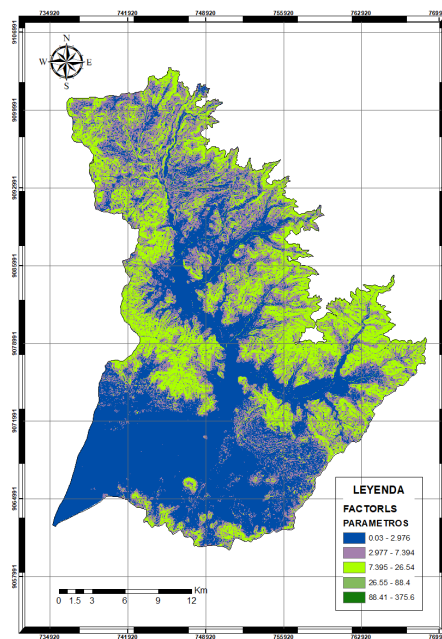


FIG.4 FACTOR LS DE RUSLE

Se determinó el factor topográfico LS a partir del mapa de pendientes en porcentaje, derivado del Aster DEM de 12.5 m de resolución espacial. El mapa obtenido para el factor topográfico LS presenta un valor medio y máximo de 187.7 y 375.5, respectivamente. El menor valor encontrado fue de 0.03, estos son valores adimensionales.

Los valores máximos aparecen asociados con áreas de fuerte pendiente, ya que esta cuenca abarca áreas montañosas dentro de la Cordillera de los Andes hacia el Este de la cuenca. Los rangos de este factor varían entre 0.03- 375.5. [15] postula

que al realizar los cálculos para la determinación del factor de longitud de la pendiente podrían llegar a alcanzar valores que superan los propuestos por [16], el cual detalla que los valores máximos de este factor pueden ser de 61.3, en tesis propuestas de España.

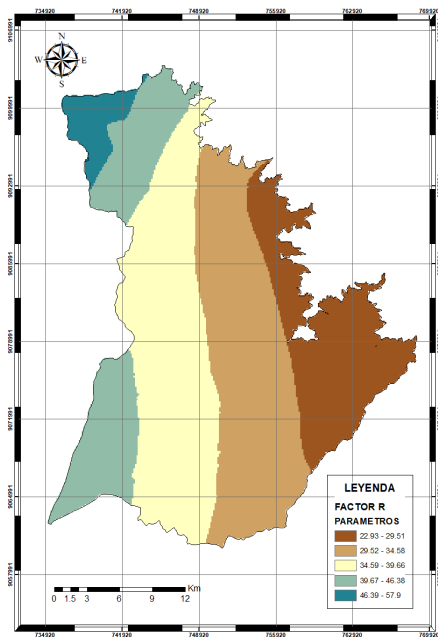


Fig.5 Factor R de RUSLE

Se plasma el resultado de la interpolación espacial de las 23 estaciones meteorológicas más cercanas a la cuenca, se observa que el índice de erosividad o factor R, oscila entre 22,93 – 57,90, los valores más elevados en este factor pueden ser identificados a la zona Noroeste de la cuenca.

Los valores obtenidos para el factor R más elevados obedecen a zonas con mayor precipitación acumulada. Para este estudio logró identificar una correlación de $R^2 = 0.9547$, lo que quiere decir que están correlacionadas íntimamente. [15] explica que en todos aquellos estudios en los que no se dispone de registros meteorológicos y pluviométricos de precipitaciones cada 15 o 30 minutos, el factor R puede ser valorado mediante el análisis de los registros diarios o mensuales de precipitación, correspondiendo así con la presente investigación, al calcular el índice de erosividad R con registros de datos pluviométricos mensuales. Así mismo, [17] estimó para la cuenca media y alta del río Rímac, el factor de erosividad de las lluvias y de la escorrentía a partir de la ecuación de Wischmeir y Smith obteniendo una relación eficiente para compararlo con el índice de erosividad ($R^2=0.82$).

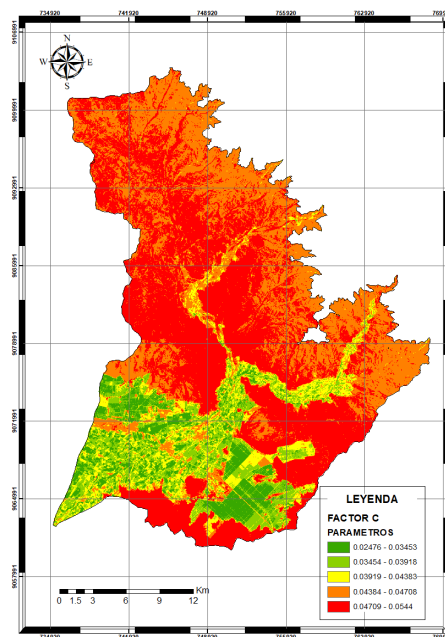


Fig.6 Factor C de RUSLE

Los valores que presenta la Fig. 6 alcanzan los 0.054, este valor significa que no existe cobertura vegetal, mientras más se acerquen los valores estudiados al número 1 más desprotegidos están los suelos, por el contrario, vemos que en la parte inferior izquierda se practica la agricultura, por lo tanto existe un manejo de suelo, los valores que nos arroja el factor C disminuyen a más de la mitad, dando a entender así que tienen un adecuado uso.

Los valores más altos para el Factor de cobertura vegetal hacen representación a una vegetación escasa y pobre, por el contrario, para los valores más cercanos se encuentran a 0.004 se asevera que tienen una alta cobertura vegetal con mucha densidad y vigorosidad. [18] hace una comparación entre los valores del factor C y el índice de vegetación de diferencia normalizada NDVI, utilizando sistemas de información geográfica con imágenes del satélite Miranda VRSS-1, obteniendo una correlación de $R^2= 0.99$, concluyendo que el NDVI resulta ser un buen indicador del factor de cobertura vegetal y puede ser expresado a través de una ecuación matemática de alta precisión, para esta investigación aquella ecuación se muestra en la Fig.7, contando también con una correlación de 1.

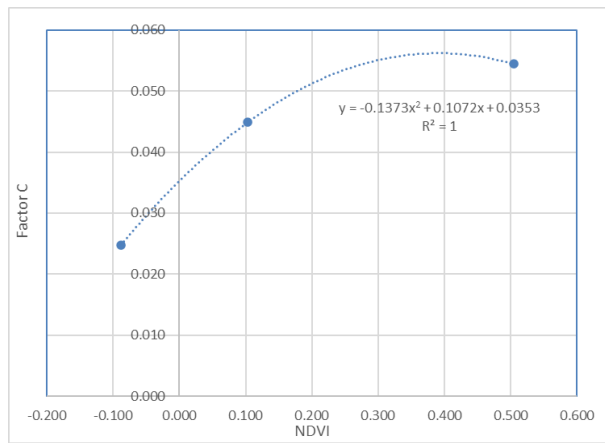


Fig.7 Correlación entre el NDVI y el Factor C

La relación entre la cobertura vegetal estudiada a través del NDVI y el Factor C de la ecuación RUSLE es evidente, en esta investigación se logró identificar esa relación y traducirla en la siguiente ecuación $FACTOR\ C = -0.1373x^2 + 0.1072x + 0.0353$ (véase en el fig. 6).

Según el $R^2 = 1$, es un indicio de las aplicaciones precisas de las imágenes satelitales Landsat 8 Oli para este tipo de investigaciones, con lo cual se puede disminuir costos y los tiempos de estudios.

TABLA V
TABLA DE RESULTADOS DEL FACTOR K

MUESTRA	M.O	TEXTURA	ARENA	ARCILLA	LIMO	PERMEABILIDAD	ESTRUCTURA	FACTOR K
1	3.69	Franco Arcilloso Arenoso	73.42	26.58	0	RAPIDA	Granular	0.07
2	2.65	Arenoso Franco	81.7	18.3	0	RAPIDA	Granular	0.04
3	1.4	Arena	91.03	0.21	8.75	RAPIDA	Granular	0.23
4	2.51	Arena	94.05	5.95	0	RAPIDA	Granular	0.1
5	3.89	Franco Arenoso	74.59	25.16	0.25	LENTA	Granular	0.29
6	1.03	Arena	91.4	8.6	0	RAPIDA	Granular	0.38
7	1.5	Arenoso Franco	89.4	10.2	0.4	RAPIDA	Granular	0.04
8	1.29	Arenoso Franco	87.26	11.9	0.84	RAPIDA	Granular	0.13
9	4.13	Franco Arenoso Arcilloso	69.98	26.55	3.47	LENTA A MODERADA	Granular	0.11
10	2.45	Arenoso Franco	84.43	14.93	0.64	RAPIDA	Granular	0.12
11	3.41	Franco Arcilloso Arenoso	62.98	32.02	5	LENTA A MODERADA	Granular	0.13
12	2.8	Franco Arcilloso Arenoso	54.91	22.43	22.66	LENTA A MODERADA	Granular	0.18
13	1.72	Arcillo arenoso	63.21	34.76	2.03	MUY LENTA	Granular	0.19
14	1.01	Franco arenoso	79.54	15.04	5.42	MODERADA A RAPIDA	Granular	0.068
15	0.84	Arena	91.9	5.21	2.89	RAPIDA	Granular	0.94
16	3.68	Franco Arcilloso Arenoso	68	24.23	7.77	LENTA	Granular	0.17

En la tabla V, se puede interpretar que dentro de la cuenca en estudio son suelos arenosos teniendo como referencia un 78% aproximadamente, seguidos por un porcentaje menor de arcilla con un 18% y finalmente pequeñas cantidades de Limo con un 4%.

Con respecto a su permeabilidad, está muy relacionada a la cantidad de arena que existen en estos suelos, ya que esto hace que una permeabilidad alta y solo en lugares donde existen cultivos la permeabilidad tiene valores más bajos.

La materia orgánica que existe en áreas cercanas a quebradas y al propio río Virú es un poco más elevada que las que se

encuentran a mayores alturas y alejadas a los cuerpos de aguas.

Se encontró que la granulometría del suelo es fina y granular gruesa según su clasificación textural, no se encontraron estructuras laminares ni en bloques.

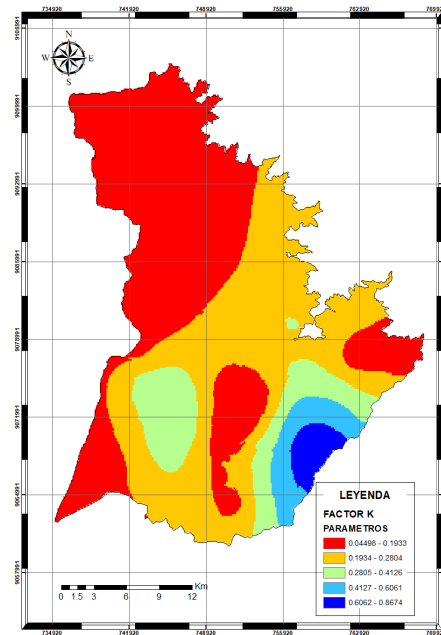


Fig.8 Factor K de RUSLE

La Fig. 8 muestra los resultados de la tabla V, interpolados espacialmente por el método Kriging mediante el Software Arcmap 10.8 dentro del área de estudio.

El valor calculado del Factor K tiene un valor medio de 0.23008 y varían en el rango de 0.867361 - 0.23008. Los suelos con mayor factor k son los que presentan una textura franco arenoso debido a la porosidad y el porcentaje de escorrentía de esta, por el contrario los zonas con menor factor son las que presentan una cantidad mayor de materia orgánica, estos resultados concuerdan con la investigación [15], el cual asevera que en las zonas de mayor erodabilidad hacen referencia a suelos granulares muy gruesos y bajo contenido de materia orgánica, mientras que las zonas con bajo factor K aparecen en suelos con agregados de estructura granular media gruesa y un contenido mayor de materia orgánica.

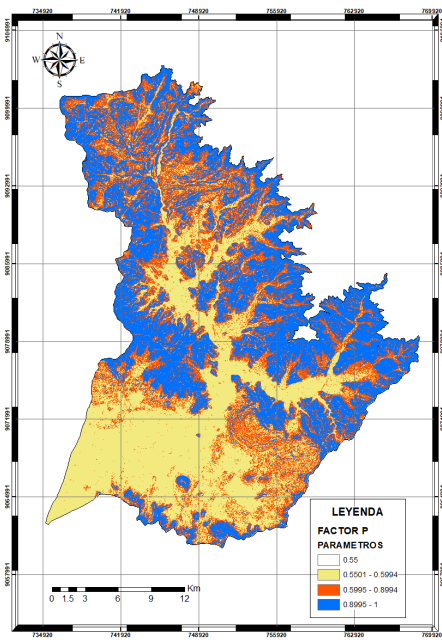


Fig.9 Factor P de RUSLE

En la presente investigación con respecto al Factor P de prácticas de conservación en el área de estudio, Se encontró los siguientes resultados que se muestran en la Fig. 9.

Se evidencia que en la zonas noreste y sureste de la cuenca están teñidas de un color azul que hace referencia a la poca protección que tienen estas zonas debido a su elevada pendiente por lo que se decidió asignarles el valor máximo de 1.

[19] menciona que el factor P es una relación entre la erosión que se produce en un campo tratado con medidas de conservación y otra parcela de referencia sin tratamiento. Por lo tanto, el factor de práctica de control de la erosión se basa en las prácticas de conservación del suelo operadas en un área en particular. El factor P (Fig. 9) oscila entre 0.55 a 1, esto quiere decir que las zonas que tienen valor 1 no tienen prácticas de conservación, por lo tanto, son más propensas a la erosión, caso contrario pasa con los valores mínimos ya que existe un tratamiento a la tierra para evitar este fenómeno.

TABLA VI
CLASIFICACIÓN DE LA EROSIÓN HÍDRICA DEL SUELO SEGÚN LA FAO

CATEGORÍA	PERDIDA DE SUELO (T.ha ⁻¹ .año ⁻¹)
LIGERA	<10
MODERADA	10 - 50
ALTA	50 - 200
MUY ALTA	>200

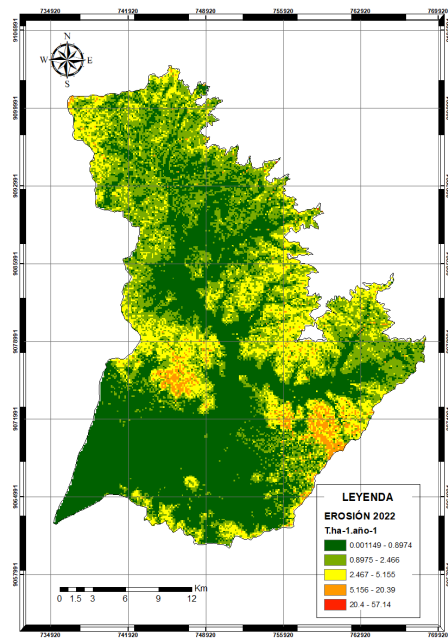


Fig.10 Mapa de erosión hídrica por método RUSLE en la cuenca baja del río Virú, la libertad, Perú 2022.

En la figura 10, muestra el resultado de la aplicación de la ecuación universal de pérdida de suelos rectificadas (RUSLE) en la Cuenca de estudio, donde se puede observar la proyección total de suelo perdido en el año 2022 en T.ha⁻¹.año⁻¹. Este resultado fue agrupado en 5 categorías de acuerdo con el nivel de pérdida que se obtuvo, siendo representado por colores verde oscuro, verde claro, amarillo, naranja y rojo, de los cuales el primero representa el valor menos significativo de erosión y el último el valor más alto en cuanto a este.

[20] considera que las pérdidas tolerables para la zona tropical es de 10 T.ha⁻¹.año⁻¹. [21] explica que erosión tolerable se refiere a la proporción máxima de pérdida de suelo que pueda ocurrir y aún permita que la productividad del cultivo sea económicamente sostenida; para la cuenca bajas del Río Virú, se ha estimado que un 82 % del terreno no ha sobrepasado dicho límite y por tanto las tasas de pérdida no han superado los procesos de formación de suelos, por el contrario, 18 % necesitan una intervención para el manejo de los suelos por pérdidas que sobrepasan las 10 T.ha⁻¹.año⁻¹.

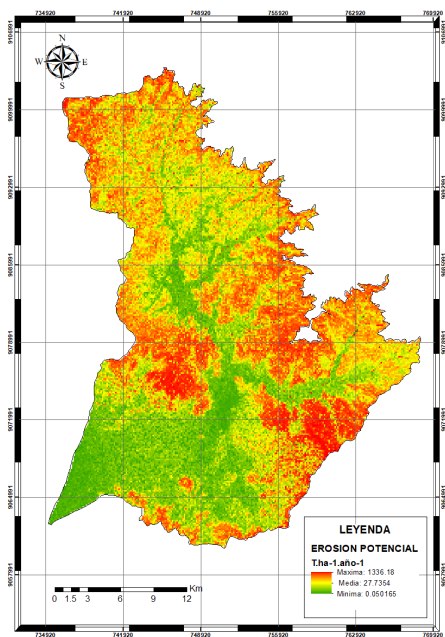


Fig.11 Mapa de erosión hídrica potencial en la cuenca baja del río Virú, la libertad, Perú 2022.

[10] Define que la erosión potencial del suelo se expresa como la cantidad máxima de sedimento que se puede ser arrastrada por la acción de la lluvia, y está determinada por los factores de la erosión R, K y LS, excluyendo los factores de protección y de cobertura vegetal. La figura 11, es el resultado de la simulación de la erosión potencial de la cuenca usando los factores LS, R y K, teniendo como resultado una erosión máxima de 1336.18 T.ha-1.año-1 en las partes donde existe una mayor cantidad de factor LS, al igual que [22] En su estudio realizado en la cuenca del río Yalujiang, se evaluó la erosión potencial utilizando el modelo RUSLE con los factores R, K y LS. Los resultados mostraron que la erosión potencial variaba entre 8,3 y 3.599,6 T.ha-1.año-1, y que el factor LS fue el más influyente en la estimación de la erosión potencial, cifras que sobrepasan por más de 7 veces la escala máxima de la FAO en cuanto a erosión de suelo.

IV. CONCLUSIONES

A partir de la hipótesis planteada, se buscó determinar la cantidad de suelo que se perdió en la cuenca baja del Río Virú en el año 2022. La hipótesis inicial suponía que la pérdida de suelo estaría en un rango de 0 - 10 T.ha-1.año-1, lo cual se considera una pérdida leve según [20]. Sin embargo, los resultados obtenidos mediante la aplicación de la ecuación universal de pérdida de suelos rectificadas (RUSLE) indican que la pérdida de suelo en la cuenca de estudio oscila entre 20.4 y 57.14 T.ha-1.año-1, lo cual indica que la pérdida de suelo es mayor de lo inicialmente supuesto.

Estos hallazgos sugieren que, si bien la mayoría del área de la cuenca presenta una erosión ligera, la presencia de áreas con pérdida moderada a alta de suelo es significativa y requiere de medidas preventivas y correctivas para evitar una mayor degradación del suelo y garantizar la sostenibilidad de los ecosistemas locales. En este sentido, es importante considerar la implementación de prácticas de conservación del suelo y agua, así como la promoción de prácticas agrícolas sostenibles y la restauración de áreas degradadas. También se puede considerar la identificación de las áreas críticas en términos de pérdida de suelo y la implementación de medidas específicas para su protección y recuperación.

Se recomienda al Gobierno Regional de La Libertad el uso de los sistemas de información geográfica como una alternativa efectiva y económica para el estudio y gestión de la superficie terrestre, especialmente en lo que se refiere a la solución de problemas medioambientales y la gestión integral del territorio. Estos sistemas ofrecen una alta precisión en la investigación y análisis de datos geoespaciales, lo que los convierte en una herramienta valiosa para la toma de decisiones informadas.

V. AGRADECIMIENTOS

A nuestros padres, por los consejos, valores y principios que nos han inculcado.

A nuestros asesores Mg. Jessica Lujan Rojas y Dr. Fernando Ugaz Odar quienes nos guiaron a través del camino de la investigación con sus conocimientos y experiencia.

A los docentes de la Escuela de Ingeniería Ambiental de la Universidad Privada del Norte, por haber compartido sus conocimientos y experiencias a lo largo de nuestra preparación profesional.

REFERENCIAS

- [1] M, Pscitelli. (2015, julio 15). «El suelo, un recurso natural y un medio dinámico» [En línea]. Available: <https://www.esup.edu.pe/wp-content/uploads/2020/12/2.%20Hernandez,%20Fernandez%20y%20Baptista-Methodolog%C3%ADa%20Investigaci%20Cientifica%206ta%20ed.pdf>
- [2] P. Huerta, O. Loli, “Erosión hídrica en la cuenca alta del río Moche” Scielo Perú, Vol. 13, n°. 01, enero 2014. Available: http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1726-22162014000100002
- [3] E. Sabino, “Atlas de Erosión de Suelos por Regiones Hidrológicas del Perú”, SENAMHI. Nota Técnica n° 0002, 2017. Available: https://idesep.senamhi.gob.pe/portaledesep/files/tematica/atlas/erosi%C3%B3n_de_suelo/Atlas_Erosion_Suelos_por_Regiones_Hidrologicas_Peru.pdf
- [4] L. Montanarella, Dan Pennock, N. McKenzie, “Estado Mundial del Recurso Suelo”, FAO y GTIS. Resumen Técnico, 2015. Available: <https://www.fao.org/3/i5126s/i5126s.pdf>
- [5] ANA, “La ANA inicia estudios de evaluación de recursos hídricos en 12 cuencas hidrográficas” 2014. Available: <http://www.ana.gob.pe/noticia/la-ana-inicia-estudios-de-evaluacion-de-recursos-hidricos-en-12-cuencas-hidrograficas-del>
- [6] R. Hernández, C. Fernández, P. Baptista, Metodología de la Investigación, 6° Edición, México, Mc Graw Hill Education, 2014. Available: <https://www.esup.edu.pe/wp-content/uploads/2020/12/2.%20Hernandez>

- %20Fernandez%20y%20Baptista-Metodolog%C3%ADa%20Investigacion%20Cientifica%206ta%20ed.pdf
- [7] P. López, “POBLACIÓN MUESTRA Y MUESTREO” Scielo, Vol. 72, N°. 01, enero 2002. Available: https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-99402002000100002
- [8] M. Vallejo, “El diseño de investigación: una breve revisión metodológica” Scielo, Vol. 09, n°. 08, 2004. Available: http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-02762004000100012
- [9] A. Quesada, A. Medina, diciembre 2020, “MÉTODOS TEÓRICOS DE INVESTIGACIÓN: ANÁLISIS-SÍNTESIS, INDUCCIÓN-DEDUCCIÓN, ABSTRACTO -CONCRETO E HISTÓRICO-LÓGICO” [En línea]. Available: https://www.researchgate.net/publication/347987929_METODOS_TEORICOS_DE_INVESTIGACION_ANALISIS-SINTESIS_INDUCCION-DEDUCCION_ABSTRACTO_-CONCRETO_E_HISTORICO-LOGICO
- [10] W. Wischmeler, D. Smith, (1978, Diciembre) “Predicting reinfall losses a guide to conservation planning” [En línea]. https://books.google.com.pe/books?hl=es&lr=&id=rRAUAAAAYAAJ&oi=fnd&pg=PA1&ots=cvrurRpvWY&sig=UaQv6Zf0iDwI8TYiMOj2Z-FcgW0&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false
- [11] A. Almagro, T. Caregnatto, C. Barbosa, R. Bahia, J. Marcato, D. Bicca, P. Sanches, (2019, mayo 01) “Improving cover and management factor (C-factor) estimation using remote sensing approaches for tropical regions” [En línea]. Available: <https://sciencedirect.com/science/article/pii/S2095633919301832>
- [12] M. Pesaran, Y. Shin, (1999), An Autoregressive Distributed Lag Modelling Approach to Cointegration Analysis. Cambridge, pp. 371-413.
- [13] D. McCool, G. Foster, C. Mutchler, L. (1989) “Revised Slope Length Factor for the Universal Soil Loss Equation” [En línea]. Available: <https://elibrary.asabe.org/abstract.asp?aid=31192>
- [14] S. Ibañez, H. Moreno, J. Gisbert (2012), “EL FACTOR LS DE LA ECUACIÓN UNIVERSAL DE PÉRDIDAS DE SUELO (USLE)” [En línea]. Available: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/16569/AD%20LS%20%20USLE.pdf>
- [15] J. Casali, L de Santisteban, J. Álvarez, J. Mena, J. Del Valle “Determination of long-term erosion rates in vineyards of Navarre (Spain) using botanical benchmarks” Catena, Vol. 78, n°. 01, pp. 12-19, Julio 2009. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0341816209000290>
- [16] F. López, J. Mintegui, (1983) “Hidráulica”, Dialnet. [En línea]. Available: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/libro?codigo=61847>
- [17] J. Quiñonez, “Estimación de la erosión hídrica potencial en la cuencamedia y alta del río Rímac, aplicación del modelo Rusle”, Tesis, titulación, Ciencias Físicas, UNMSM, Lima, 2019. Available: <https://es.scribd.com/document/525761462/Estimacion-de-La-Erosion-Hidrica-Potencial-en-La-Cuenca-Media-y-Alta-Del-Rio-Rimac-Aplicacion-Del-Modelo-Rusle-Quinonez#>
- [18] H. Pacheco, R. Cevallos, C. Vences, “del factor C de la RUSLE, en la cuenca del río Carache, Trujillo-Venezuela usando imágenes del Satélite Miranda VRSS-1” Espacios, Vol. 40, n°. 03, pp. 06, enero 2019. Available: <https://www.revistaespacios.com/a19v40n03/19400306.html>
- [19] A. Huassain, S. Parlia, A. Alam, 2011, “INTEGRATION OF GIS AND UNIVERSAL SOIL LOSS EQUATION (USLE) FOR SOIL LOSS ESTIMATION IN A HIMALAYAN WATERSHED” [En línea]. Available: https://www.researchgate.net/publication/286921198_INTEGRATION_OF_GIS_AND_UNIVERSAL_SOIL_LOSS_EQUATION_USLE_FOR_SOIL_LOSS_ESTIMATION_IN_A_HIMALAYAN_WATERSHED
- [20] Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, The state of food and agriculture, 1980, ISBN, Italia, 1981. Available: <https://www.fao.org/documents/card/es/c/dd46b737-3166-5b35-a369-293425f0a66a/>
- [21] K. Renard, J. Freimund, Using monthly precipitation data to estimate the R-factor in the revised USLE, USA, Elsevier, 1994. Available: <https://www.tucson.ars.ag.gov/unit/publications/PDFfiles/942.pdf>
- [22] Liu Y, Yuan F, Guo Z, Zhang Y, Li Z. Evaluating soil erosion and sediment yield in an agricultural watershed on the Loess Plateau of China using the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). Catena. 2021;205:105451.