






Spatial prediction of soil erosion in arid areas by remote sensing. A case study: Quebrada del Diablo, Tacna, Perú

Jesús Mejía-Marcacuzco ^{*,a} , Edwin Pino-Vargas^b , Edilberto Guevara-Pérez^a ,
Víctor Olivos-Alvites^c , Milagros Condori-Ventura^d 

^aPrograma de Doctorado en Recursos Hídricos, Universidad Nacional Agraria La Molina Lima, Perú

^bUniversidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, Tacna, Perú

^cPrograma de Maestría en Recursos Hídricos, Universidad Nacional Agraria La Molina Lima, Perú

^dFacultad de Ingeniería Agrícola, Universidad Nacional Agraria La Molina Lima, Perú

Abstract.- This research deals with the evaluation of soil water erosion in an arid zone of the Tacna region in southern Peru, taking the Quebrada del Diablo as a case study. The USLE (Universal Soil Loss Equation) and RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation) models were used in connection with geographic information systems (GIS) and remote sensing techniques. The *R*, *K*, *LS*, *C* and *P* factors of the models were calculated on the basis of local rainfall information registered in three stations, and data from remote sensors integrated through the GIS, thus obtaining a simple and effective tool to determine maps, areas and rates of erosion. The results indicate that the maximum rate of water erosion, due to the extraordinary precipitation that occurred in 2020, calculated using both models varies from 0 to 50 t/ha-year, a variation considered in the low, light and moderate range. The USLE and RUSLE models show potential erosion less than 10 t/ha-year for 71,81 % and 45,27 % of the study area, respectively; for erosion rates greater than 10 t/ha-year, the calculated areas with the RUSLE model exceed those estimated with the USLE model.

Keywords: soil erosion; erosive potential; USLE, RUSLE models; Quebrada del Diablo

Predicción espacial de la erosión del suelo en zonas áridas mediante teledetección. Estudio de caso: Quebrada del Diablo, Tacna, Perú

Resumen.- La presente investigación trata sobre la evaluación de la erosión hídrica del suelo en una zona árida de la región Tacna al sur de Perú, tomando como caso de estudio la Quebrada del Diablo. Se usaron los modelos USLE (Universal Soil Loss Equation) y RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation) en conexión con sistemas geográficos de información (GIS) y técnicas de teledetección. Los factores *R*, *K*, *LS*, *C* y *P* de los modelos fueron calculados a partir de información pluviométrica local registrada en tres estaciones y de datos provenientes de sensores remotos integrados mediante el GIS, obteniendo así una simple y efectiva herramienta para determinar mapas, áreas y tasas de erosión. Los resultados indican que la máxima tasa de erosión hídrica, debido a la precipitación extraordinaria ocurrida el año 2020, calculada mediante ambos modelos, varía de 0 a 50 t/ha/año, variación considerada en el rango bajo, ligero y moderado. Los modelos USLE y RUSLE arrojan un potencial de erosión menor a 10 t/ha/año para el 71,81 % y el 45,27 % del área de estudio, respectivamente; para tasas de erosión mayores a 10 t/ha/año las áreas calculadas con el modelo RUSLE superan a los estimados con el modelo USLE.

Palabras clave: erosión del suelo; Potencial Erosivo; modelos USLE y RUSLE; Quebrada del Diablo

Recibido: 28 de julio, 2021.

Aceptado: 24 de agosto, 2021.

1. Introducción

El suelo es un recurso natural esencial que se está degradando a una escala sin precedentes, tanto

en intensidad, como en extensión geográfica. La degradación varía desde la pérdida de suelo, sus elementos nutritivos y materia orgánica, a través de la erosión, hasta la acumulación de solutos como la salinización del suelo [1].

Uno de los principales procesos de esa degradación se debe a la erosión hídrica, proceso que afecta alrededor de 80 % de la superficie de suelos agrícolas en el mundo, especialmente en las

* Autor para correspondencia:

Correo-e: jabel@lamolina.edu.pe (J. Mejía)

regiones tropicales y subtropicales [2, 3].

El proceso de erosión se entiende como la remoción, transporte y deposición de partículas de suelo, materia orgánica y nutrientes solubles. Ocurre en diversos grados de intensidad, llegando muchas veces hasta condiciones extremas, tales que, no es posible restaurarlas, provocando en consecuencia el desequilibrio de la estabilidad armónica a nivel de toda la cuenca hidrográfica, como sucede en Perú [4].

En el sur de Perú, en febrero del 2020, lluvias de ocurrencia excepcional activaron la Quebrada del Diablo, ocasionando como producto de la erosión hídrica grandes volúmenes de sedimentos, que causaron cuantiosas pérdidas económicas e incluso la vida de personas. En el libro de Fortunato Zora Carvajal “Tacna: Historia y Folclore” se narra la ocurrencia de un fenómeno similar en febrero de 1927, hace 94 años, por la activación de la misma Quebrada del Diablo, sepultando viviendas y desenterrando y arrastrando cuerpos del cementerio general [5].

La sedimentación, fenómeno asociado al proceso de erosión, colmata cauces, reduciendo la capacidad de regulación hídrica de la cuenca y resultando en desborde del cauce e inundaciones [6]. Este fenómeno afecta a la región de Tacna en el sur de Perú, por lo que se hace necesario llevar a cabo investigaciones para estimar su intensidad. En el presente estudio se evalúa la erosión potencial del suelo de la Quebrada del Diablo, mediante los modelos USLE y RUSLE, para eventos de precipitación histórica y para las precipitaciones excepcionales ocurridas en la región en el año 2020.

2. Descripción del área de estudio

En la Figura 1 se muestra el área de estudio, la cual viene a ser la Quebrada del Diablo, ubicada en los distritos de Ciudad Nueva y Alto de la Alianza de la provincia y departamento de Tacna al sur de Perú. Corresponde a una zona costera árida con precipitaciones acumuladas anuales muy escasas que varían entre 0 y 60 mm [7]. El área de la cuenca es de 51,95 km²; 71,54 km de perímetro y una pendiente media de 19,83 %. El punto más bajo se encuentra entre las coordenadas UTM 366005,1

y 8009632,94, zona 19 S, a 672 m s.n.m. y el más alto a 1981 m s.n.m.

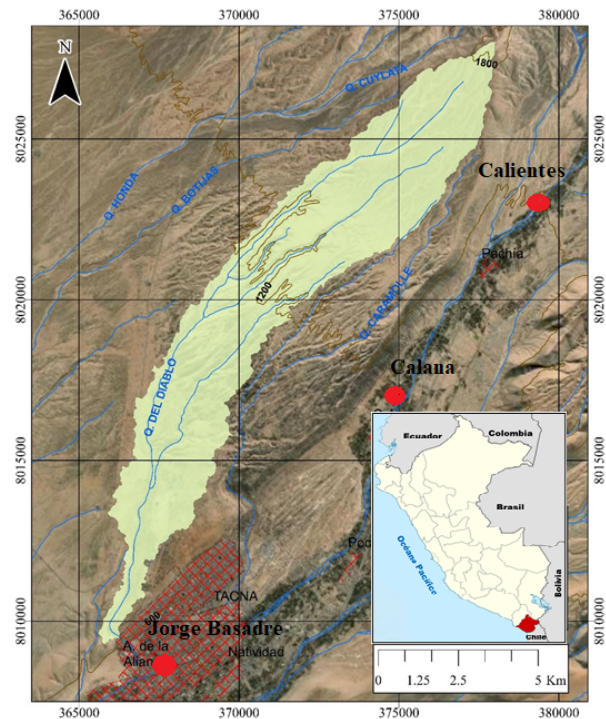


Figura 1: Mapa de ubicación del área de estudio

Según la clasificación Climática del Perú, la Quebrada del Diablo, se encuentra en una zona de clima árido, semicálido y húmedo [8]. De acuerdo con el estudio de zonificación realizado por el Ministerio del Ambiente (MINAM, 2013), el 54,92 % de cuenca Quebrada del Diablo son tierras marginales áridas de escasa vegetación sin uso y el 39,64 % tierras con praderas no mejoradas. Las temperaturas medias anuales máxima y mínima para el período 1950-2019, son de 23,6 °C y 12,7 °C, respectivamente [9, 10].

El Instituto Geológico Minero y Metalúrgico [11] reporta en la zona de estudio las siguientes unidades lito estratigráficas: Formaciones Huayllilla (Nm-hu_s) y Millo(Np-mi); depósitos aluviales (Qh-al2); depósitos residuales (Q-re) y depósitos de cenizas volcánicas (Qh-ce). En la Tabla 1 se presentan algunas características principales de la cuenca y en la Figura 2 la curva hipsométrica (tipo A, en partes altas y bajas con alto potencial erosivo), [7].

Tabla 1: Características morfométricas del área de estudio

Parámetro	Magnitud	Descripción
Factor de forma	>1,75	Casi rectangular alargada
Índice de Circularidad	0,127	Oblonga
Tiempo de Concentración (h)	5,74	Ec. Williams
Rectángulo Equivalente	a: 1,517 b: 34,255	m m

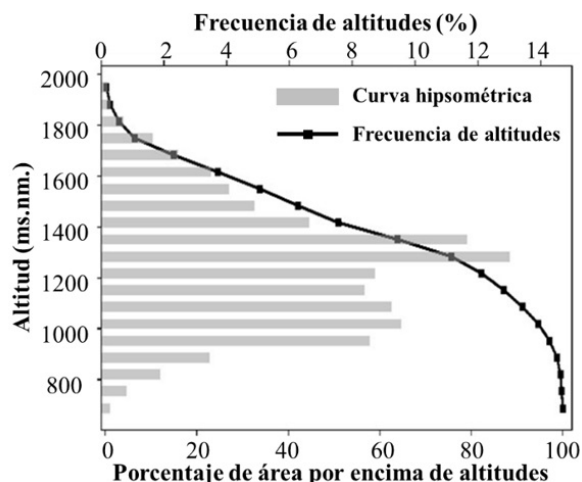


Figura 2: Curva hipsométrica de la Quebrada del Diablo

3. Materiales y métodos

Mapas temáticos del área de estudio

Obtenidos de la zonificación realizada por Ministerio de Ambiente [12] y aprobada en el 2013 por la ordenanza regional N°016–2012-CR/Gob.Reg.Tacna. A nivel meso (escala 1/50000), los mapas usados para la zona de estudio, fueron: mapa geológico, uso actual de tierras, cobertura vegetal.

Precipitación

Precipitación diaria de la base de datos meteorológicos a nivel nacional de SENAMHI, período 1997-2020 de las estaciones Jorge Basadre, Calana y Calientes.

Imágenes de sensores remotos

Mosaico del satélite Alos Palsar Alaska (con resolución espacial de 12,5 m) usadas en MDT, para

la delimitación de la cuenca, mapas de pendientes, redes de drenaje. (<https://search.asf.alaska.edu/#/>)

Estimación de la pérdida de suelo

Existen diferentes métodos de estimación de pérdida de suelos. En el presente estudio se usaron los modelos USLE (Universal Soil Loss Equation) y RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation). Wischmeier & Smith [13] describen el modelo USLE con la ecuación (1):

$$A = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P \quad (1)$$

Donde A es la pérdida de suelo para el periodo seleccionado (t/ha), R es el factor de erosividad de la lluvia en (MJ.mm/ha-año), K el factor de erosividad del suelo en (t/ha)/(MJ.mm/ha-año), L representa el factor de longitud del terreno, S es el factor de pendiente del terreno, C el factor de cobertura y manejo de la vegetación y P el factor de prácticas de conservación. Los factores L , S , C y P son adimensionales.

De otro lado, RUSLE viene a ser un modelo USLE-Revisado [14, 15], el mismo que al igual que el primero, ha obtenido una buena aceptación en América y en otros países con problemas de erosión [4, 16, 17, 18, 19].

Los grados de erosión del suelo se presentan en la Tabla 2, tomados de la clasificación propuesta por la FAO (1980) [19].

Tabla 2: Tolerancias de erosión establecidas por FAO-PNUMA-UNESCO [19]

Clases de erosión	Pérdida de suelos (t/ha/año)
Nula aligera	Menor a 10
Moderada	10 a 50
Alta	50 a 200
Muy alta	Mayor a 200

Estimación de los factores de erosión hídrica

a) Factor de erosividad de la lluvia (R)

El factor de erosividad es un índice numérico que expresa la capacidad de la lluvia para erosionar el suelo [13]. Debido a que no se dispone de registros de intensidad de lluvia (mm/h) se usará para ambos modelos USLE y RUSLE el índice de Fournier

Modificado (IFM) dado en la Tabla 3 y que se expresa mediante la ecuación (2) [20]:

$$IFM = \sum_{i=1}^{12} \frac{P_i^2}{P} \quad (2)$$

donde,

IFM : Índice de Fournier Modificado (mm);

P_i : Precipitación del mes *i* (mm);

P : Precipitación total anual (mm).

Tabla 3: Clasificación del Índice de Fournier Modificado

IFM	Clasificación
0-60	Muy bajo
60-90	Bajo
90-120	Moderado
120-160	Alto
>160	Muy alto

El factor de erosividad *R* se calcula según la ecuación (3) [16, 21].

$$R = EI_{30} = 67,355 \cdot \left(\frac{r^2}{P}\right)^{0,85} \quad (3)$$

Donde *EI*₃₀ es el valor medio mensual del factor de erosividad *R* (MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ año⁻¹), *r* es la precipitación mensual en mm y *P* es la precipitación anual en mm.

El factor *R* para el modelo RUSLE se calculó mediante la ecuación (4) [21] como sigue:

$$R_m = 161 (IFM_m)^{0,552} \quad (4)$$

b) Factor erodabilidad del suelo (*K*)

El factor (*K*) indica la susceptibilidad del material de la superficie del suelo a la erosión; es una medida empírica de la erodabilidad del suelo dependiente de las propiedades intrínsecas del suelo [22]. Los valores de *K*, para el área de estudio, se obtuvieron del mapa geológico de la región Tacna, elaborado por el Ministerio del Ambiente [12] cuya información fue compatibilizada con el mapa de suelos elaborado por la FAO; obteniéndose las unidades de suelo dadas en la Tabla 4: Litosol (I), Fluvisol Eútrico (JE) y Androsol Vítrico (TV).

Para calcular el factor *K* (t ha h/MJ ha mm), se utilizó la ecuación propuesta por Sharpley y

Tabla 4: Unidades de suelo en la zona de estudio

Unidad de suelo	Capa superficial del suelo				
	Arena %	Limo %	Arcilla %	MO %	Área km ²
I	58,9	16,2	24,9	0,97	18,12
JE	70,8	12,8	16,5	1,15	33,12
TV	64,5	26,2	9,3	1,4	0,71
Areal	66,56	14,17	19,33	1,09	51,95

Willians, 1990 dada en [21] y expresada en la ecuación (5):

$$K = 0,1317 \cdot f_{csand} \cdot f_{(cl-si)} \cdot f_{orgc} \cdot f_{hisand} \quad (5)$$

donde:

$$f_{csand} = 0,2 + 0,3 \cdot \exp\left(-2,56 \cdot m_s \cdot \left(1 - \frac{m_{silt}}{100}\right)\right)$$

$$f_{(cl-si)} = \left(\frac{m_{silt}}{m_c + m_{silt}}\right)^3$$

$$f_{orgc} = 1 - \frac{0,25 \cdot orgC}{orgC + \exp(3,72 - 2,95 \cdot orgC)}$$

*f*_{hisand} =

$$1 - \frac{0,7 \cdot \left(1 - \frac{m_s}{100}\right)}{1 - \frac{m_s}{100} + \exp\left(-5,51 + 22,9 \cdot \left(1 - \frac{m_s}{100}\right)\right)}$$

Más específicamente, en la ecuación (5), *f*_{sand} es la fracción de arena en porcentaje (0,05-2,00 mm de diámetro), *f*_{silt} la fracción de limo en porcentaje (0,002–0,05 mm de diámetro), *f*_{cl} la fracción de arcilla en porcentaje (<0,002 mm de diámetro); *f*_{orgc} el contenido de carbono orgánico en porcentaje y *f*_{hisand} el contenido de arena gruesa en porcentaje

En la Tabla 5 se presentan los rasgos de la erodabilidad [23].

c) Factor topográfico *LS*

La topografía contribuye con dos factores a la erosión del suelo, tanto en el modelo USLE, como en el modelo RUSLE; estos son el factor de longitud (*L*) y el factor de pendiente (*S*) [14, 15]. En general, a medida que aumenta el factor *L*, la erosión del suelo aumenta debido al progresivo incremento de

Tabla 5: Calificación de la erodabilidad

Código	Erodabilidad (t ha h MJ ⁻¹ ha ⁻¹ mm ⁻¹)	Clasificación
1	Menor de 0,01	Natural
2	0,01 a 0,02	Muy bajo
3	0,02 a 0,04	Bajo
4	0,04 a 0,06	Moderado
5	0,06 a 0,08	Alto
6	0,08 a 0,10	Muy alto
7	0,10 a 0,15	Severo
8	Mayor de 0,15	Extremadamente severo

la escorrentía; del mismo modo, a medida que se incrementa el factor *S*, la velocidad y erosividad de la escorrentía aumentan.

La longitud de inclinación de ladera influye considerablemente en las tasas de erosión del suelo, siendo el relieve uno de los principales factores que determina la producción de sedimentos de las cuencas de las vertientes [17].

El factor de longitud de la pendiente (*L*) es adimensional, definido como el cociente entre la tasa de erosión anual de una parcela con una longitud de pendiente dada λ y la tasa de erosión de esa parcela de longitud de ladera estándar de 22,13 m; se determina mediante la ecuación (6), [13]:

$$L = \left(\frac{\lambda}{22,13} \right)^m \quad (6)$$

El factor pendiente (*S*) está dado en función del porcentaje de la pendiente de la ladera *s*, según la ecuación (7) :

$$S = 0,065 + 0,045 \cdot s + 0,0065 \cdot s^2 \quad (7)$$

El factor *LS* se calcula mediante la combinación de las ecuaciones (6) y (7) [20]

$$LS = \left(\frac{\lambda}{22,13} \right)^m \left(0,065 + 0,045 \cdot s + 0,0065 \cdot s^2 \right) \quad (8)$$

La longitud de la pendiente λ es obtenida usando la distancia entre pixeles de 12,5 m, para ambos modelos. El exponente *m*, para el modelo USLE, depende de la pendiente de la ladera y varía de 0,2 a 0,5 como se muestra en la Tabla 6 [16].

Para el modelo RUSLE, *m* es influenciado por la longitud y grado de pendiente, calculado con la

Tabla 6: Valores del exponente *m*

Condición	<i>m</i>
Pendiente >5 %	0,5
3 % <pendiente <5 %	0,4
1 % <pendiente <3 %	0,3
Pendiente <1 %	0,2

ecuación (9):

$$m = \frac{\beta}{1 + \beta} \quad (9)$$

El parámetro β se obtiene mediante la ecuación (10), como función del ángulo de la pendiente θ en radianes:

$$\beta = \frac{\sin \theta}{0,0896 + 3 \cdot (\sin \theta)^{0,8} + 0,56} \quad (10)$$

El parámetro θ es el ángulo de la pendiente en grados que debe ser transformado a radianes para efectos de cálculos.

Para calcular el factor de inclinación (*S*), se usan las ecuaciones (11) y (12):

$$S = 10,8 \cdot \sin \theta + 0,03; \text{ pendientes } < 9 \% \quad (11)$$

$$S = 16,8 \cdot \sin \theta - 0,5; \text{ pendientes } \geq 9 \% \quad (12)$$

En el flujograma dado en la Figura 3 se presenta el procedimiento a seguir para obtener el factor *LS* por los métodos USLE y RUSLE.

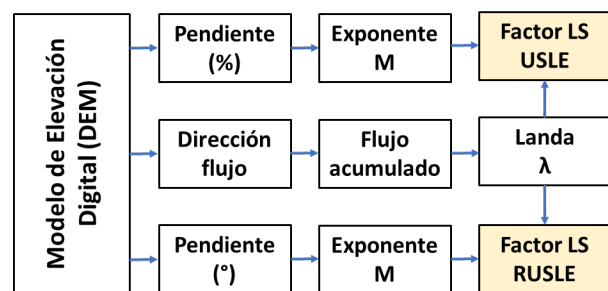


Figura 3: Secuencia para la determinación del factor *LS* mediante modelos USLE y RUSLE

d) Factor Cobertura Vegetal (*C*)

La cobertura vegetal es el elemento natural de protección del suelo contra la energía cinética o fuerza erosiva de la lluvia, controlando no sólo la energía de las gotas, sino la velocidad de la

escorrentía superficial [4]. Este factor se define como la relación entre la pérdida del suelo de tierra cultivada bajo ciertas condiciones y la pérdida de suelo de tierra con labranza y sin cultivo [13]. El factor C se determina como el índice de vegetación de diferencia normalizada ($NDVI$), mediante la ecuación (13) [24, 23, 25]:

$$C = \exp(-\alpha \cdot NDVI^\beta - NDVI) \quad (13)$$

Vander Knijff *et al.* [26] indican que asumiendo una escala lineal con $\alpha = 2$ y $\beta = 1$, el factor C oscila entre $0,009 < C < 1,501$. Por consiguiente, el factor de cultivo C puede estimarse mediante la ecuación (14), como sigue:

$$C = \exp\left(-2 \cdot \frac{NDVI}{1 - NDVI}\right) \quad (14)$$

En la Tabla 7 se presentan los valores del factor C para cada tipo de uso del suelo, cultivos y prácticas agrícolas [26].

Tabla 7: Índice de factor de cobertura vegetal C

Clase	Factor C	Descripción
1	0,1	Bosque y selva nublada
2	0,2	Bosque, cultivos y pastizales
3	0,3	Matorrales y pastizales
4	0,4	Cultivos y pastoreo
5	0,5	Cultivos y arbustos
6	0,6	Vegetación escasa
7	0,9	Vegetación semiárida
8	1	Suelo desnudo

e) Factor prácticas de conservación (P)

Este factor recoge la influencia que tienen las prácticas de conservación de suelos sobre las tasas de erosión de una parcela, realizando los trabajos culturales o cultivando en curvas de nivel, en franjas o terrazas para cortar las líneas de escorrentía [16, 4].

Durante el trabajo de campo no se observaron actividades o prácticas de conservación, en toda el área de estudio, asumiendo, por tanto, para este factor un valor de $P = 1$.

4. Resultados y discusión

En la Figura 4 se presenta el pluviograma anual de los registros de precipitaciones de las tres

estaciones existentes en el área del proyecto. El cálculo del promedio anual de la lluvia arroja un valor de 11,8 mm, considerado baja y típico de zonas áridas como es la región de Tacna.

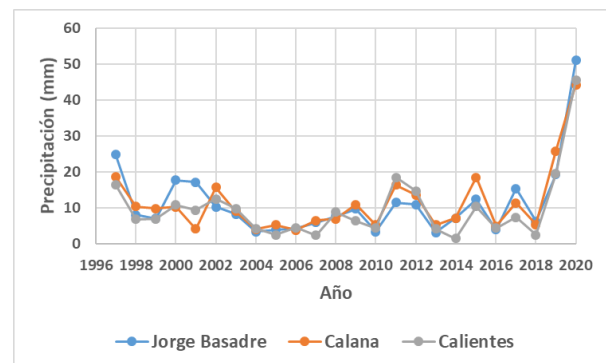


Figura 4: Precipitación anual 1997 – 2020

4.1. Factor de erosividad R

Para estimar el factor de erosividad de la lluvia se usaron los registros de precipitación correspondiente al año 2020, como se muestra en la Figura 5. Se observa la ocurrencia de lluvias extraordinarias de 51,0 mm, 44,2 mm y 45,6 mm, en las estaciones de Jorge Basadre, Calana y Calientes, respectivamente.

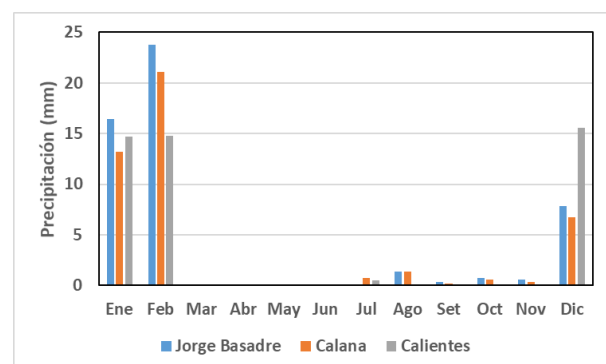


Figura 5: Precipitación del año 2020

En la Tabla 8 se presentan los resultados obtenidos para los Índices Modificados de Fournier y Factor R para cada una de las tres estaciones meteorológicas. Los valores del Índice Modificado de Fournier IMF, para el año 2020, varían en el rango de 14,885 a 17,63 mm, con una variación menor que el 20% entre las estaciones; estos valores se consideran como de nivel bajo. El

modelo RUSLE arroja valores de R más elevados que el Modelo USLE, para cada estación, siendo la variación de un 30 % en todas ellas; sin embargo, el rango de variación, entre estaciones para el mismo método no pasa del 10 por ciento.

Tabla 8: Índice Modificado de Fournier y factor R

Estación	IMF mm	R -USLE (MJ.mm/ha.h.año)	R -RUSLE (MJ.mm/ha.h.año)
Jorge Basadre	17,63	883,215	1243,063
Calana	15,097	772,051	1144,048
Calientes	14,885	788,85	1177,746

En las Tablas 9 y 10 y en las Figuras 6 y 7 se presentan los resultados de erosividad, para el área de estudio, estimados mediante los modelos USLE y RUSLE respectivamente.

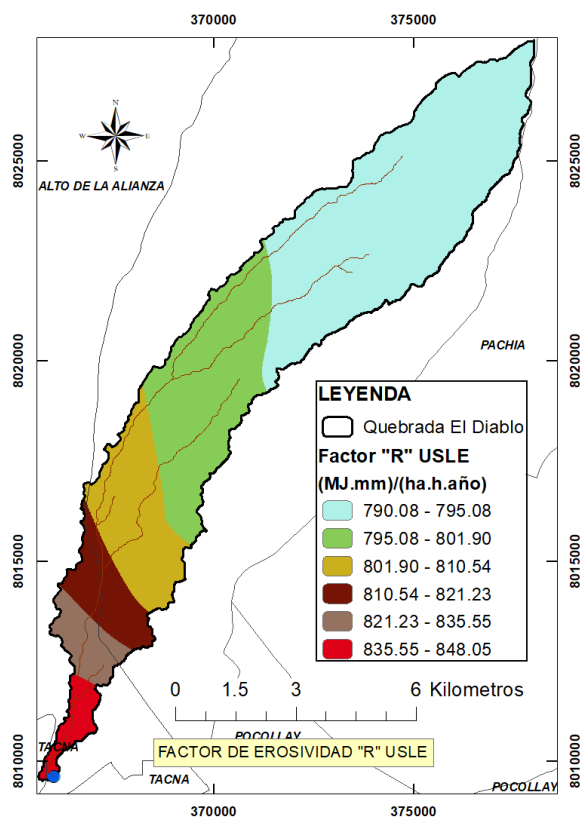


Figura 6: Mapa de factor de erosividad R -USLE

La erosividad R para el modelo USLE, varía en el rango de 790,08 a 848,05 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ año⁻¹; mientras que para el modelo RUSLE, el factor R está en el rango de 1171,74 a

Tabla 9: Factor de erosividad R para USLE

Rango	Área (km ²)	Porcentaje
790,08 - 795,08	24,985	48,1
795,08 - 801,90	12,319	23,72
801,90 - 810,54	7,293	14,04
810,54 - 821,23	3,482	6,7
821,23 - 835,55	2,365	4,55
835,55 - 848,05	1,501	2,89
Total	51,946	100

1212,7 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ año⁻¹. Las áreas de mayor erosividad se localizan en la parte baja, probablemente debido a la falta de cobertura vegetal y medidas de protección.

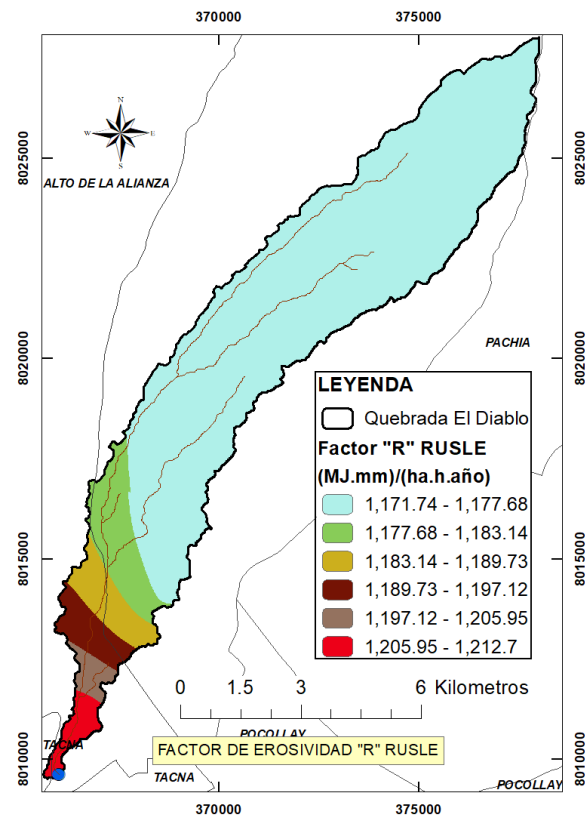


Figura 7: Mapa de factor de erosividad R -RUSLE

Factor erodabilidad (K):

En la Quebrada del Diablo hay predominancia de arena con un 66,56 % de arena seguido de arcilla con 19,33 %, limo 14,17 % y materia orgánica con 1,09 %. En la Tabla 11 y en la Figura 8 se presenta los resultados obtenidos para el factor K . Según la FAO, se tiene tres tipos de suelos: I (Litosol),

Tabla 10: Factor de erosividad *R* para RUSLE

Rango	Área (km ²)	Porcentaje
1171,74 - 1177,68	41,912	80,68
1177,68 - 1183,14	3,855	7,42
1183,14 - 1189,73	2,3	4,43
1189,73 - 1197,12	1,828	3,52
1197,12 - 1205,95	0,881	1,7
1205,95 - 1212,7	1,17	2,25
Total	51,946	100

JE (Fluvisol Eútrico) y TV (Andosol vítrico) [27]. Los valores estimados del factor de erodabilidad *K* (Tn ha h/MJ ha mm) es de 0,015 para el tipo de suelo JE, 0,0156 para el tipo de suelo TV y 0,0169 para el tipo de suelo I. Según la clasificación de Rivera y Gómez [28], el área de estudio presenta baja erodabilidad.

Tabla 11: Factor de erodabilidad *K*

Rango	Área (km ²)	Porcentaje
0,01496-0,01542	0,742	1,43
0,01542-0,01581	31,399	60,45
0,01581-0,01626	1,824	3,51
0,01626-0,01669	1,853	3,57
0,01669-0,01697	16,127	31,05
Total	51,946	100

En las Figuras 9 y 10 se da el factor *LS* para el método USLE y RSLE, respectivamente. El factor *LS* refleja el efecto de la longitud y la inclinación de la pendiente en la erosión del suelo. El 67,27 % del área de estudio tiene una pendiente comprendida entre 4° a 12°; sin embargo, se han detectado valores de pendiente que varían de 33° a 61° en zonas próximas a las quebradas. El factor *LS* varía de 0 a 34, calculados para el modelo USLE, con valores predominantes entre 0 a 0,5 para el 64,22 % del área de estudio.

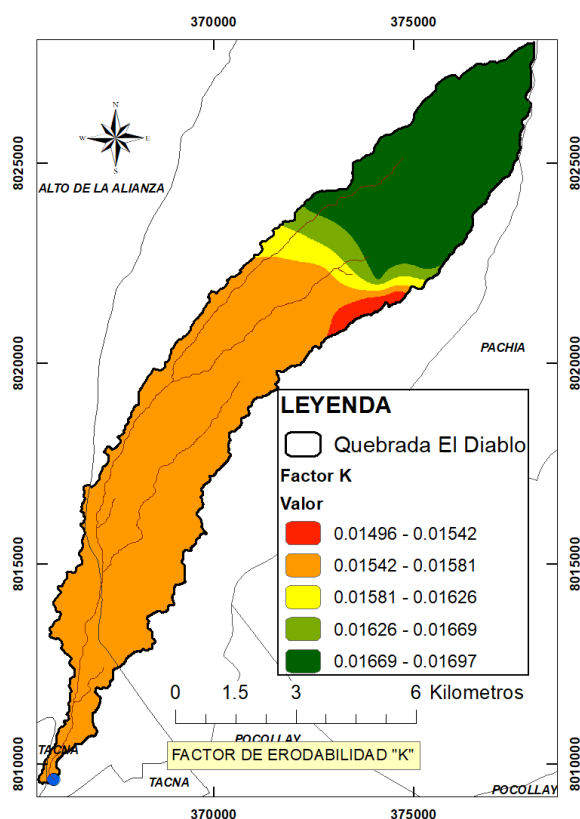


Figura 8: Mapa de factor de erodabilidad *K*

Factor Topográfico (*LS*):

En la Tabla 12 se presentan los rangos de pendientes con sus respectivas áreas para los modelos USLE y RUSLE, respectivamente.

Tabla 12: Rango de pendientes de la cuenca

Grados	Porcentaje	Área (km ²)	Área (%)
0 - 4	0 - 7,8	13,467	25,92
4-12	7,8 - 25,5	24,169	46,52
12-21	25,5 - 45,3	9,123	17,56
21 - 33	45,3 - 66,5	4,234	8,15
33 - 61	66,5 - 180,5	0,958	1,84
Total		51,95	100

En las Tablas 13 y 14 se presentan los resultados para el parámetro *LS* de ambos modelos. Los valores de *LS* calculados para el modelo RUSLE varía de 0 a 94 correspondiendo el 56,9 % del área de estudio a valores comprendidos entre 0 y 0,7. Estos resultados indican que el factor *LS* tiene baja incidencia en la erosión del suelo, tanto para el modelo USLE como para el modelo RUSLE, salvo en zonas cercanas a las quebradas.

Tabla 13: Factor *LS* para USLE

Rango	Área (km ²)	Porcentaje
0 - 0,5	33,358	64,22
0,5 - 2	12,791	24,62
2 - 3	3,021	5,82
3 - 5	2,328	4,48
5 - 15	0,446	0,86
15 - 34	0,002	0,004
Total	51,946	100

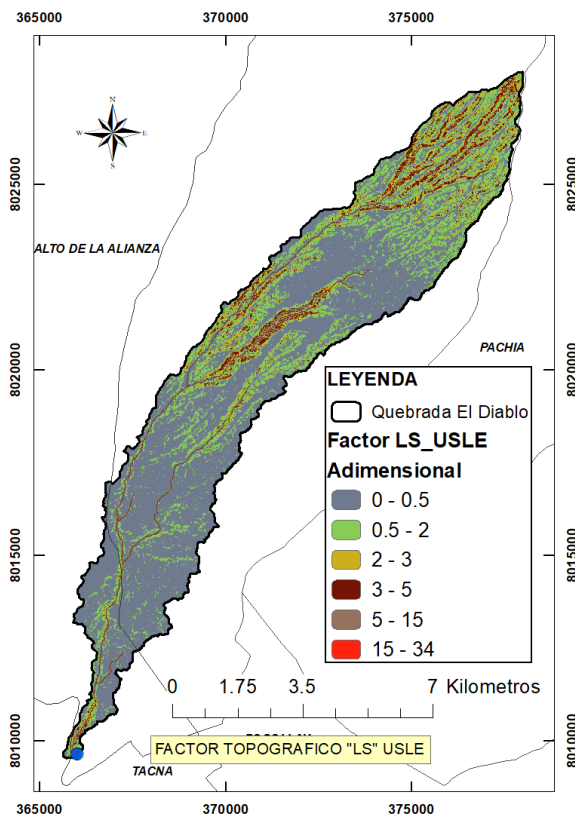


Figura 9: Mapa de factor $LS - USLE$

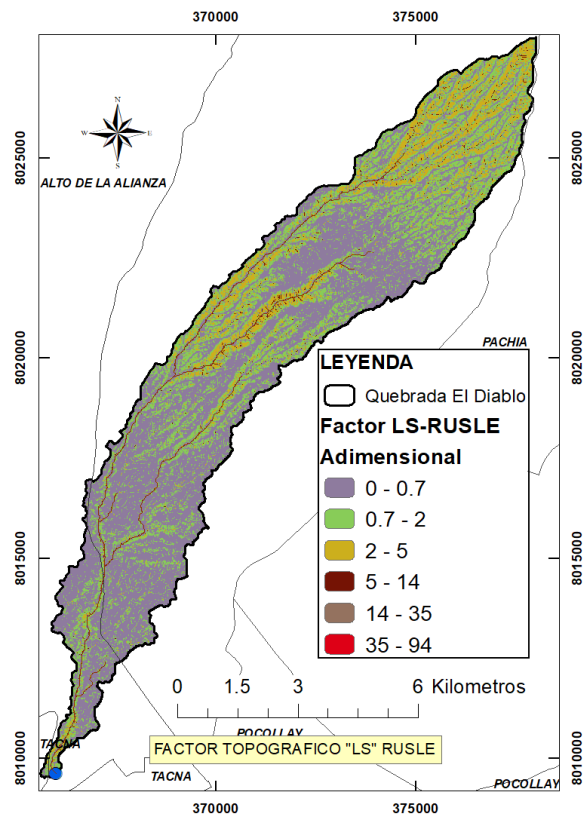


Figura 10: Mapa de factor $LS - RUSLE$

Tabla 14: Factor LS para $RUSLE$

Rango	Área (km ²)	Porcentaje
0 - 0,7	29,558	56,9
0,7 - 2	16,008	30,82
2 - 5	5,918	11,39
5 - 14	0,424	0,82
14 - 35	0,034	0,07
35 - 94	0,004	0,01
Total	51,946	100

4.2. Factor de cobertura vegetal (C):

En las zonas áridas y semiáridas, cuando la cobertura basal es mayor al 70% la erosión hídrica es insignificante [28]; sin embargo, estas zonas son las que presentan una mayor vulnerabilidad a la erosión debido a la remoción de la cubierta vegetal natural por pastoreo o implantación de cultivos. En la Tabla 15 se muestran los resultados de la clasificación de los suelos y áreas ocupadas, los cuales muestran que el 83,83% del área de estudio corresponde a suelo desnudo y tierras degradadas, mientras que el 16,17% de área posee una escasa vegetación propias de especies típicas de zonas

desérticas.

Tabla 15: Clasificación del suelo y área ocupada

Suelo	Área (km ²)	Porcentaje
Vegetación Escasa	0,426	0,82
Vegetación Semiárida	7,972	15,35
Suelo desnudo	43,548	83,83
Total	51,946	100

En la Figura 11 se presenta el mapa del factor de cobertura vegetal. Se aprecia que la mayor parte de la cuenca muestra suelo desnudo con manchas escasas de vegetación semiárida.

4.3. Erosión potencial:

En las Tablas 16 y 17 y en las Figuras 12 y 13 se presentan los resultados obtenidos para la erosión potencial (dada por el producto $R \cdot K \cdot LS$), estimada mediante los modelos USLE y RUSLE, respectivamente. El resultado para el modelo USLE es predominantemente bajo con valores de 0 a 7 t/ha/año en el 65,97% del área y de 7 a

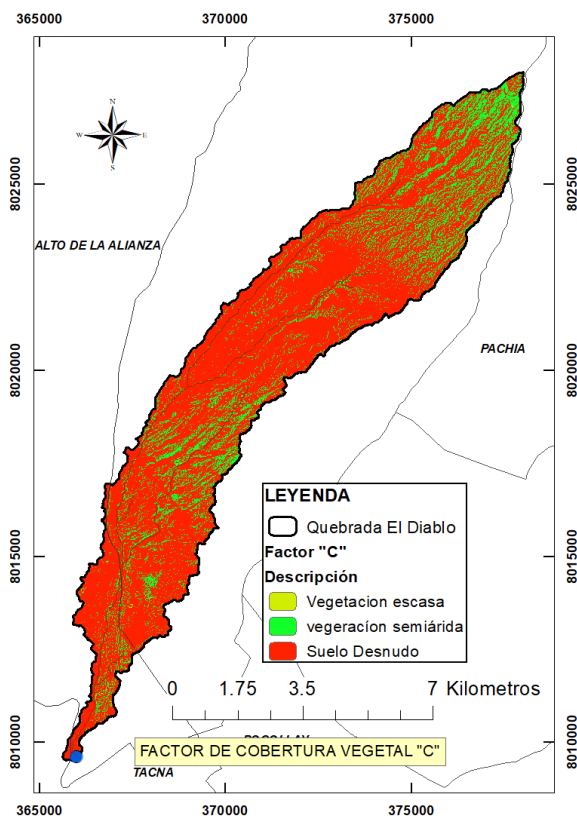


Figura 11: Mapa de factor de cobertura vegetal

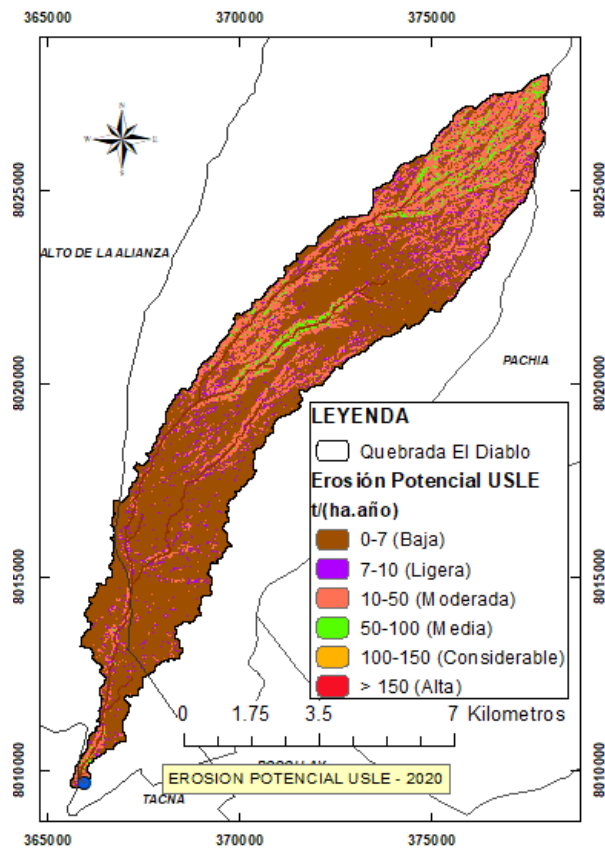


Figura 12: Erosión potencial USLE (2020)

50 t/ha/año, entre ligera y moderada, en el 31,58 % del área y solo el 0,1 % del área de estudio presenta erosión potencial mayor a 100 t/ha/año.

Con respecto a los valores obtenidos para la erosión potencial, mediante el modelo RUSLE, se puede indicar que el 45,275 % del área de estudio tiene una erosión ligera, menor de 10 t/ha/año, 48,50 % del área, una erosión moderada, de 10 a 50 t/ha/año y solo el 6,23 % del área con una erosión severa, mayor a 50 t/ha/año.

Estos valores de erosión potencial fueron comparados con resultados de estudios similares, como las tolerancias establecidas por FAO (1980), dados en la Tabla 2.

4.4. Erosión potencial actual:

En las Tablas 18 y 19 y en las Figuras 14 y 15 se presentan los resultados obtenidos para erosión potencial actual ($R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P$), estimada mediante el modelo los modelos USLE y RUSLE, respectivamente. Para el caso de USLE, el 69,08 % del área de estudio presenta una erosión baja de

Tabla 16: Erosión potencial con USLE

Rango	Área (km ²)	Porcentaje
0 - 7	34,27	65,97
7 - 10	3,032	5,84
10 - 50	13,372	25,74
50 - 100	1,221	2,35
100 - 150	0,045	0,09
>150	0,006	0,01
Total	51,946	100

Tabla 17: Erosión potencial con RUSLE

Rango	Área (km ²)	Porcentaje
0 - 7	17,835	34,33
7 - 10	5,684	10,94
10 - 50	25,192	48,5
50 - 100	2,812	5,41
100 - 150	0,26	0,5
>150	0,163	0,31
Total	51,946	100

0 a 7 t/ha/año, el 29,53 % del área presenta una erosión de ligera a moderada, de 7 a 50 t/ha/año, y solo el 1,39 % del área presenta erosión mayor a 50 t/ha/año.

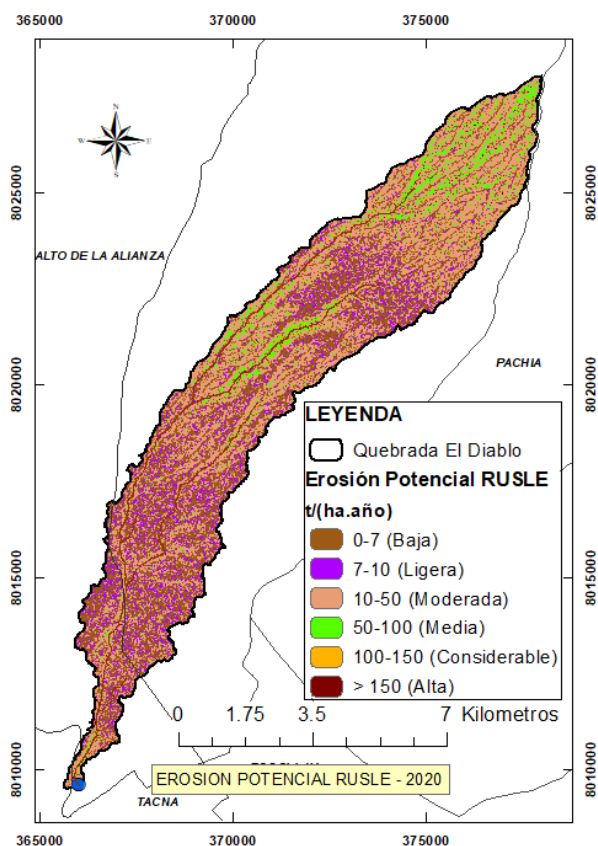


Figura 13: Erosión potencial RUSLE (2020)

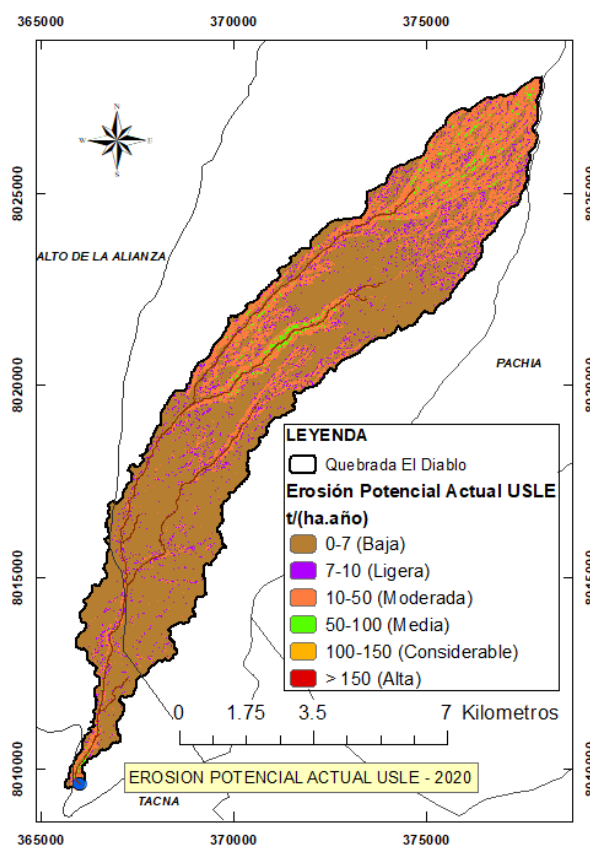


Figura 14: Erosión potencial actual USLE (2020)

Tabla 18: Erosión potencial actual con USLE

Rango	Área (km ²)	Porcentaje
0 - 7	35,884	69,08
7 - 10	3,033	5,84
10 - 50	12,306	23,69
50 - 100	0,637	1,23
100 - 150	0,052	0,1
>150	0,033	0,06
Total	51,946	100

La erosión potencial actual, estimada mediante el modelo RUSLE indica que el 39,44 % del área de estudio presenta una erosión baja de 0 a 7 t/ha/año, el 11,84 % del área una erosión ligera, 45,17 % del área una erosión moderada entre 10 y 50 t/ha/año y solo el 3,54 % del área presenta erosión mayor a 50 t/ha/año, considerada de media a alta.

5. Conclusiones

En el presente estudio se muestra el efecto de la erosión hídrica sobre el área de una cuenca ubicada en una región árida, como es el caso de la Quebrada del Diablo, Tacna, Perú. La tasa, anual, de erosión

Tabla 19: Erosión potencial actual con RUSLE

Rango	Área (km ²)	Porcentaje
0 - 7	20,489	39,44
7 - 10	6,15	11,84
10 - 50	23,466	45,17
50 - 100	1,506	2,9
100 - 150	0,198	0,38
>150	0,136	0,26
Total	51,946	100

del suelo se determinó mediante los modelos USLE y RUSLE a partir de base de datos del entorno GIS. La tasa de erosión calculada, mediante USLE corresponde al rango de 0 a 7 t/ha/año (baja) y de 7 a 10 t/ha/año (ligera). Con el modelo RUSLE se obtuvieron resultados en el rango, predominante, de 7 a 10 t/ha/año (ligera) y de 10 a 50 t/ha/año (moderada). Estos resultados son coherentes con las estimaciones reportadas por Senamhi (2017) [4] y la clasificación de FAO sobre grados de erosión.

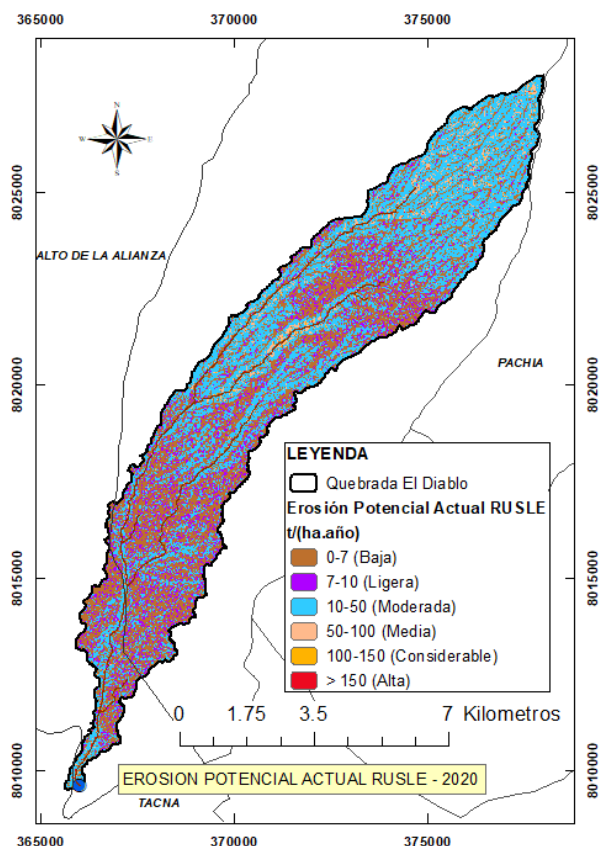


Figura 15: Erosión potencial actual RUSLE (2020)

6. Referencias

- [1] J. Boardman and D. Favis-Mortlock, *Modelling Soil Erosion by Water*, ser. Nato ASI Subseries I. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1998, vol. 55.
- [2] D. Pimentel and N. Kounang, “Ecology of Soil Erosion in Ecosystems,” *Ecosystems*, vol. 1, no. 416–426, 1998.
- [3] T. Napier, M. Tucker, and S. McCarter, “Adoption of conservation production systems in three Midwest watersheds,” *Journal of Soil and Water Conservation*, vol. 55, no. 2, pp. 123–134, 2000.
- [4] E. Sabino, O. Felipe, y W. Lavado, “Atlas de Erosión de Suelos por Regiones Hidrológicas del Perú,” Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI), Lima, Perú, Tech. Rep., 2017.
- [5] G. Jara y G. Ramos, “Propuesta de un modelo de gestión de riesgos para prevenir desastres naturales ocasionado por huaycos en el sector de la Quebrada el Diablo – Tacna 2021,” Master’s thesis, Universidad Privada de Tacna, 2021.
- [6] O. Rosales, “Aplicación del modelo RUSLE para estimar pérdidas de suelo por erosión hídrica. Caso: Río Chota, Ecuador,” Master’s thesis, Universidad de Salzburg, Austria, 2020.
- [7] F. Cabrera and G. Huayna, “Estudio de riesgo y alternativas de protección de la población en la zona de influencia de la Quebrada del Diablo, Tacna, Perú,” Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann-tacna, Tacna, Perú, Reporte de investigación, 2021.
- [8] SENAMHI, “Clasificación climática del Perú. Método de Thornthwaite,” Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI), Lima, Perú, Tech. Rep., 1988.
- [9] E. Pino-Vargas, I. Montalvan-Díaz, y C. Avendaño-Jihuallanga, “La disponibilidad hídrica futura en los ecosistemas de zonas áridas en el Sur de Perú y Norte de Chile,” *Agroindustrial Science*, vol. 9, no. 2, pp. 173–178, 2019.
- [10] V. Pino, L. Ramos, J. Mejía, E. Chávarri, y D. Ascencios, “Medidas de mitigación para el acuífero costero La Yarada, un sistema sobreexplotado en zonas áridas,” *Idesia (Arica)*, vol. 38, no. 3, pp. 21–31, 2020.
- [11] INGEMMET, “Evaluación de peligros geológicos en las quebradas del Diablo y Caramolle en Tacna. Tacna, Perú,” Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, Tech. Rep., 2020.
- [12] Ministerio Nacional de Ambiente, “Zonificación Ecológica y Económica de Tacna. Tacna, Perú,” Ministerio Nacional de Ambiente, Perú, Tech. Rep., 2013.
- [13] W. Wischmeier and D. Smith, *Predicting rainfall erosion losses—a guide to conservation planning*. Estados Unidos de América: Department of Agriculture, Science and Education Administration, USA., 1978.
- [14] K. Renard, J. Laflen, G. Foster, and D. Mccool, *Soil Erosion Research Methods*. Soil and Water Conservation Society, Ankeny, 1994, ch. The Revised Universal Soil Loss Equation, pp. 105–126.
- [15] K. Renard, G. Foster, G. Weesies, D. MacCool, and D. Yoder, *Predicting soil erosion by water. A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)*. Washington, D.C.: ARS Publication, USDA, 1993.
- [16] E. Guevara and A. De La Torre, *Gestión Integrada de Recursos Hídricos por Cuenca y Cultura del Agua*. Lima, Perú: Autoridad Nacional del Agua, Lima Perú, 2019.
- [17] E. Guevara and A. Marquez, “Comparison of three models to predict annual sediment yield in Caroní river basin, Venezuela,” *Journal of Urban and Environmental Engineering. JUEE*, vol. 1, no. 1, 2007.
- [18] E. Guevara, *Sistemas de Conservación y Rehabilitación de Cuencas*. Valencia, Venezuela: CDCH UC, 2000.
- [19] D. Portuguez, “Estimación de la pérdida de suelos por erosión hídrica en la cuenca del río Sigwas, utilizando geoinformática,” *Anales Científicos*, vol. 76, no. 2, pp. 324–329, 2015.
- [20] M. Escobar, “Mitigación de la erosión hídrica para la conservación del suelo en la subcuenca del río Ichu, Huancavelica,” Master’s thesis, Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú, 2019.
- [21] J. Díaz, “Diagnóstico del potencial de erosión hídrica mediante técnicas de geoprocesamiento en la sub-

- Cuenca del río Angasmarca, La Libertad, Peru,” *Anales Científicos*, vol. 76, no. 2, p. 283, 2015.
- [22] G. Fu, S. Chen, and D. McCool, “Modelling the impacts of no-till practices on soil erosion and sediment yield with RUSLE, SEDD and ArcView GIS,” *Soil and Tillage Research*, vol. 85, no. 1–2, pp. 38–49, 2006.
- [23] P. Zhou, O. Luukkanen, T. Tokola, and J. Nieminen, “Effect of vegetation cover on soil erosion in a mountainous watershed,” *Catena*, vol. 75, no. 3, pp. 319–325, 2008.
- [24] A. Ramírez-Ortiz, E. Hincapié-Gómez, y S. Sadeghian-Khalajabadi, “Erodabilidad de los suelos de la zona central cafetera del departamento de Caldas, Colombia,” *Cennicafé*, vol. 60, no. 1, pp. 58–71, 2009.
- [25] M. Kouli, P. Soupios, and F. Vallianatos, “Soil erosion prediction using the revised universal soil loss equation (RUSLE) in a GIS framework, Chania, Northwestern Crete, Greece,” *Environmental Geology*, vol. 57, pp. 483–497, 2009.
- [26] J. Van der Knijff, J. Jonas, and L. Montanarella, “Soil Erosion Risk Assessment in Europe,” European Soil Bureau, Tech. Rep., 2000.
- [27] C. Loredó, S. Beltrán, F. Moreno, y M. Casadiano, “Riesgo a la Erosión Hídrica y Proyección de Acciones de Manejo y Conservación de Suelos en 32 Microcuencas de San Luis Potosí,” INIFAP, Tech. Rep., 2007.
- [28] H. Rivera y A. Gómez, “Erodabilidad de los suelos de la zona cafetera central colombiana (Caldas, Quindío y Risaralda),” *Suelos Ecuatoriales*, vol. 25, pp. 86–93, 1995.