

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

DEPARTAMENTO FORESTAL



Estimación de la Erosión Hídrica Mediante el Método RUSLE en la Región Cañera  
de la Subcuenca Pujiltic.

Por:

**URBANO GÓMEZ GARCÍA**

Investigación Descriptiva

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

**INGENIERO FORESTAL**

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México

Junio 2019

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

DEPARTAMENTO FORESTAL

Estimación de la Erosión Hídrica Mediante el Método RUSLE en la Región Cañera  
de la Subcuenca Pujiltic

Por:

**URBANO GÓMEZ GARCÍA**

Investigación Descriptiva

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

**INGENIERO FORESTAL**

Aprobada por el Comité de Asesoría:



M.C. Héctor Darío González López  
Asesor Principal



Dr. Mario Alberto García Aranda  
Coasesor



M.C. José Aniseto Díaz Balderas  
Coasesor



Dr. Gabriel Gallegos Morales  
Coordinador de la División de Agronomía



Buenavista, Saltillo, Coahuila, México

Junio 2019

## TABLA DE CONTENIDO

ÍNDICE DE CUADROS.....	iv
ÍNDICE DE FIGURAS.....	vi
RESUMEN .....	viii
I INTRODUCCIÓN .....	1
1.1    Objetivo general .....	2
1.2    Objetivo específico .....	2
II REVISIÓN DE LITERATURA .....	3
2.1    El suelo .....	3
2.2    Erosión del suelo .....	3
2.3    Tipos de erosión .....	3
2.3.1    Erosión hídrica .....	3
2.3.2    Erosión eólica.....	4
2.4    Factores que intervienen en el proceso de erosión hídrica .....	4
2.6.1    Factor erosividad de la lluvia R.....	6
2.6.2    Factor erosionabilidad del suelo K .....	7
2.6.3    Factor longitud de la pendiente L y ángulo de la pendiente S (LS) .....	10
2.6.4    Factor cobertura del suelo C .....	11
2.6.5    Factor prácticas de retención del suelo P .....	12
2.7    Erosión hídrica potencial.....	13
2.8    Erosión hídrica actual.....	13
2.9    Cultivos que contribuyen a la erosión.....	13
2.10    Cultivo de caña de azúcar.....	14
2.11    Fenología de la planta de azúcar .....	14
2.12    Obras de conservación del suelo .....	16

2.13 Estudios realizados .....	16
III MATERIALES Y MÉTODOS .....	18
3.1 Ubicación geográfica .....	18
3.2 Hidrología.....	18
3.3 Geología .....	18
3.4 Edafología.....	18
3.5 Clima .....	18
3.6 Vegetación .....	19
3.7 Metodología para el cálculo de los parámetros de la Ecuación Universal de pérdida de suelo revisada RUSLE .....	19
3.7.1 Factor erosividad de la lluvia (R) en mj.mm/ha.h.....	19
3.7.2 Factor de erosionabilidad del suelo (K) ton.h/MJ.mm .....	21
3.7.3 Factor longitud y ángulo de inclinación de la pendiente LS .....	21
3.7.4 Factor de vegetación y cultivo (C) .....	23
3.7.5 Factor de prácticas mecánicas de retención de suelo (P).....	24
IV RESULTADOS .....	25
4.1 Factor erosividad de la lluvia R .....	25
4.2 Factor erosionabilidad del suelo K.....	28
4.3 Factor longitud y ángulo de inclinación de la pendiente LS.....	29
4.4 Factor cubierta del suelo C .....	30
4.5 Factor practicas mecánicas P .....	34
4.6 Resultado RUSLE por mes .....	35
4.7 Resultado RUSLE 2018 .....	46
V CONCLUSIONES .....	49
VI RECOMENDACIONES .....	50

VII LITERATURA CITADA.....	51
VIII APÉNDICE O ANEXOS .....	54

## ÍNDICE DE CUADROS

<b>Cuadro 1</b> Ecuaciones regionalizadas para la república mexicana (becerra, 1997), donde P es la precipitación .....	7
<b>Cuadro 2</b> Valor K, de acuerdo con el tipo de suelo de la clasificación desarrollada por la WRB, donde G es textura gruesa, M textura media y F textura es fina .....	9
<b>Cuadro 3</b> Valores del factor cobertura de suelo (C) por tipo de uso de suelo y vegetación Renard, 1997; Becerra 1997; Montes, 2002.....	12
<b>Cuadro 4</b> Valores del factor P (Wischmeier y Esmith, 1978) .....	13
<b>Cuadro 5</b> Desarrollo de fórmulas para el factor longitud de la pendiente (L) y ángulo de la pendiente (S) en la calculadora de mapas .....	22
<b>Cuadro 6</b> Resultados del factor erosividad de la lluvia R de la subcuenca Pujiltic .....	25
<b>Cuadro 7</b> Resultados del factor cubierta de suelo C para cada mes del año 2018, en la Subcuenca Pujiltic.....	31
<b>Cuadro 8</b> Tasa de erosión mediante método RUSLE para el mes de enero de la subcuenca Pujiltic .....	36
<b>Cuadro 9</b> Tasa de erosión hídrica mediante método RUSLE para el mes de febrero de la subcuenca Pujiltic .....	37
<b>Cuadro 10</b> Tasa de erosión hídrica mediante método RUSLE para el mes de marzo de la subcuenca Pujiltic .....	38
<b>Cuadro 11</b> Tasa de erosión hídrica mediante método RUSLE para el mes de abril de la subcuenca Pujiltic .....	39
<b>Cuadro 12</b> Tasa de erosión hídrica mediante método RUSLE para el mes de mayo de la subcuenca Pujiltic .....	40
<b>Cuadro 13</b> Tasa de erosión hídrica mediante método RUSLE para el mes de julio de la subcuenca Pujiltic .....	41
<b>Cuadro 14</b> Tasa de erosión hídrica mediante método RUSLE para el mes de agosto de la subcuenca Pujiltic .....	42
<b>Cuadro 15</b> Tasa de erosión hídrica mediante método RUSLE para el mes de octubre de la subcuenca Pujiltic.....	44

<b>Cuadro 16</b> Tasa de erosión hídrica mediante método RUSLE para el mes de noviembre de la subcuenca Pujiltic .....	45
<b>Cuadro 17</b> Tasa de erosión hídrica mediante método RUSLE para el mes de diciembre de la subcuenca Pujiltic .....	46
<b>Cuadro 18</b> Tasa de erosión hídrica mediante método RUSLE del año 2018 de la subcuenca Pujiltic .....	48

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> Ciclo biológico del cultivo de caña de azúcar (Allen, 2006).....	15
<b>Figura 2</b> Estaciones meteorológicas utilizadas para generar el raster del factor erosividad de la lluvia R .....	20
<b>Figura 3</b> Factor erosividad de la lluvia R de enero (A) y febrero (B) de la subcuenca Pujiltic .....	26
<b>Figura 4</b> Factor erosividad de la lluvia R de marzo (C) y abril (D) de la subcuenca Pujiltic .....	26
<b>Figura 5</b> Factor erosividad de la lluvia R de mayo (E) y julio (F) de la subcuenca Pujiltic .....	27
<b>Figura 6</b> Factor erosividad de la lluvia R agosto (G) y octubre (H) de la subcuenca Pujiltic .....	27
<b>Figura 7</b> Factor erosividad de la lluvia R de noviembre (I) y diciembre (J) de la subcuenca Pujiltic .....	28
<b>Figura 8</b> Factor erosionabilidad del suelo K de la subcuenca Pujiltic .....	29
<b>Figura 9</b> Factor longitud y ángulo de inclinación la pendiente LS de la subcuenca Pujiltic .....	30
<b>Figura 10</b> Factor cubierta de suelo C de enero (A) y febrero (B) de la subcuenca Pujiltic .....	32
<b>Figura 11</b> Factor cubierta de suelo C de marzo (C) y abril (D) de la subcuenca Pujiltic .....	32
<b>Figura 12</b> Factor cubierta de suelo C de mayo (E) y julio (F) de la subcuenca Pujiltic .....	33
<b>Figura 13</b> Factor cubierta de suelo C de agosto (G) y octubre (H) de la subcuenca Pujiltic .....	33
<b>Figura 14</b> Factor cubierta de suelo C de noviembre (I) y diciembre (J) de la subcuenca Pujiltic .....	34
<b>Figura 15</b> Factor prácticas mecánicas de retención del suelo P de la subcuenca Pujiltic .....	35
<b>Figura 16</b> Tasa de erosión hídrica mediante método RUSLE para el mes de enero de la subcuenca Pujiltic .....	36

<b>Figura 17</b> Tasa de erosión hídrica mediante método RUSLE para el mes de febrero de la subcuenca Pujiltic .....	37
<b>Figura 18</b> Tasa de erosión hídrica mediante método RUSLE para el mes de febrero de la subcuenca Pujiltic .....	38
<b>Figura 19</b> Tasa de erosión hídrica mediante método RUSLE para el mes de abril de la subcuenca Pujiltic .....	39
<b>Figura 20</b> Tasa de erosión hídrica mediante método RUSLE para el mes de mayo de la subcuenca Pujiltic .....	40
<b>Figura 21</b> Tasa de erosión hídrica mediante método RUSLE para el mes de julio de la subcuenca Pujiltic .....	42
<b>Figura 22</b> Tasa de erosión hídrica mediante método RUSLE para el mes de agosto de la subcuenca Pujiltic .....	43
<b>Figura 23</b> Tasa de erosión hídrica mediante método RUSLE para el mes de octubre de la subcuenca Pujiltic.....	44
<b>Figura 24</b> Tasa de erosión hídrica mediante método RUSLE para el mes de noviembre de la subcuenca Pujiltic.....	45
<b>Figura 25</b> Tasa de erosión hídrica mediante método RUSLE para el mes de diciembre de la subcuenca Pujiltic .....	46
<b>Figura 26</b> Tasa de erosión hídrica mediante método RUSLE del año 2018 de la subcuenca Pujiltic .....	48

## RESUMEN

La erosión de suelo es el arrastre de la capa superficial por influencia del ser humano o de manera natural. El suelo representa una importancia económica en el ámbito agronómico y forestal, ya que es el sustento de productos comestibles. El presente estudio aplica Sistemas de Información Geográfica (SIG) para determinar la erosión hídrica, estimar la erosión del suelo aplicando la ecuación universal de pérdida de suelo revisada (RUSLE), determinar el efecto del cultivo de caña en la pérdida de suelo por erosión; así como identificar cuál es el factor que más propicia a la erosión hídrica. Para generar el mapa en formato raster del factor R se utilizaron datos de precipitación de 35 estaciones, el factor erosionabilidad del suelo K, el factor longitud y ángulo de la pendiente LS, el factor cubierta del suelo C y el factor prácticas mecánicas de retención del suelo P.

La erosión hídrica actual del año 2018 de la subcuenca Pujiltic en los terrenos con pendientes pronunciadas y sin cobertura vegetal es de 5.94 % que representa las tres categorías primordiales (alta, muy alta y extrema). Los terrenos planos representa el 94.06 % con erosión baja.

## I INTRODUCCIÓN

La erosión del suelo es el desplazamiento del componente superficial por influencia natural y antropogénica. Con respecto a la influencia natural, la erosión se da mediante el viento y agua; mientras que por la acción del hombre se encuentra el cambio y uso del suelo, deforestación y sobrepastoreo; para el caso de la erosión hídrica el valor aumenta cuando el suelo se encuentra completamente desnudo (Doduque y Escobar, 2002).

El efecto de la erosión representa una pérdida económica en la agricultura y ganadería debido a que se pierde gran cantidad de nutrientes por lo que existe una baja producción. Otra de las consecuencias es la pérdida de biodiversidad, la fertilidad del suelo, como también la migración de personas y escases de alimentos (Zabala *et al.*, 2011).

El modelo RUSLE estima la erosión del suelo, en la cual se utiliza cinco factores (erosividad de la lluvia “R”, erosionabilidad del suelo “K”, longitud y ángulo de la pendiente “LS”, cubierta del suelo “C”, prácticas mecánicas de retención de suelo “P”), las cuales están asociadas a la tasa de erosión; se utiliza para una mejor planificación del uso y manejo del suelo, determinar que tanta erosión propicia ciertos cultivos y la cantidad de impactos ambientales que se generan al suelo (Cléríci y García , 2001).

El modelo RUSLE permite identificar las áreas más propensas a la erosión hídrica y está diseñado para superficies pequeñas o medianas. RUSLE es más utilizada con sistemas de información geográfica (Cléríci y García, 2001).

Estudios demuestran que RUSLE identifica las zonas con mayor desprendimiento de sedimentos, cuál de los cinco parámetros influye a que exista una mayor tasa de erosión y proporciona información para la implementación de prácticas de conservación de suelo de acuerdo a la severidad del problema (Röder *et al.*, 2006).

Uno de los parámetros que más relación tiene con la pérdida de suelo es el factor cubierta de suelo “C”, por lo que en áreas de cultivo es necesario conocer la fenología de la planta. Un claro ejemplo es el cultivo del arroz, que en pendientes fuertes contribuye a la erosión hídrica (Clérici y García , 2001).

Otro de los parámetros es el factor longitud y ángulo de inclinación de la pendiente “LS”, por tal motivo se puede inferir que a mayor pendiente mayor erosión hídrica (Aguilar, 2015).

Una desventaja de este método es que en la mayoría de los estudios no se cuenta con información sobre el factor prácticas mecánicas de retención del suelo “P”; por lo tanto el resultado sería una aproximación y si se desea un resultado más preciso habría que realizar un estudio experimental (Aguilar, 2015).

Para contrarrestar el problema de erosión hídrica es recomendable establecer prácticas de conservación de suelo, como son: plantaciones forestales, esparcimiento de abonos, que el suelo no se encuentre sin cubierta vegetal en la temporada de lluvias (Zabala *et al.*, 2011).

Las obras de conservación disminuyen la erosión hídrica, debido al establecimiento de presas filtrantes en las áreas con pendientes pronunciadas; esto es un claro ejemplo de las prácticas mecánicas de conservación del suelo (Aguilar, 2015).

### **1.1 Objetivo general**

Aplicar Sistemas de Información Geográfica (SIG) para determinar la erosión hídrica.

### **1.2 Objetivo específico**

Estimar la erosión del suelo aplicando la Ecuación Universal de pérdida de suelo revisada (RUSLE).

Determinar el efecto del cultivo de caña en la pérdida de suelo por erosión.

Identificar el factor que más propicia a la tasa de erosión.

## **II REVISIÓN DE LITERATURA**

### **2.1 El suelo**

Desde el punto de vista físico el suelo se puede considerar como un sistema muy complejo, heterogéneo, disperso y que se encuentra en estado sólido, líquido y gaseoso. Presenta como característica principal que es un sistema dinámico, determinado por efectos que provocan agentes como la temperatura, la luz, la presión total, el agua, los solutos y los organismos (Gavande, 1979).

### **2.2 Erosión del suelo**

La erosión del suelo es el desplazamiento del componente superficial por influencia natural y antropogénica. Con respecto a la influencia natural, la erosión se da mediante el viento y agua; mientras que por la acción del hombre se encuentra el cambio y uso del suelo, deforestación y sobrepastoreo; para el caso de la erosión hídrica el valor aumenta cuando el suelo se encuentra completamente desnudo (Doduque y Escobar, 2002).

Gavande (1979) define la erosión como el proceso de separación y transporte de los materiales del suelo por los agentes de la erosión. Este proceso consta de dos etapas: las partículas del suelo se desprenden de la masa del suelo y la última etapa es el arrastre de estos materiales desprendidos.

### **2.3 Tipos de erosión**

#### **2.3.1 Erosión hídrica**

Es el efecto causado por las gotas de la lluvia y esta se divide en tres tipos: deformación del terreno, efectos negativos fuera del terreno y pérdida de suelo superficial. La deformación del terreno son las cárcavas y los efectos fuera del terreno es la contaminación de algún río debido al arrastre de suelo contaminado. La pérdida de suelo superficial es la más grave, ya que esta disminuye la cantidad de nutrientes, la cantidad de materia orgánica, la cantidad de la tasa de infiltración y la retención del agua (SEMARNAT, 2002).

### **2.3.2 Erosión eólica**

Representa el efecto negativo del viento hacia la superficie descubierta de vegetación. Este tipo de erosión afecta más a las zonas semiáridas, áridas y terrenos deforestados. Sus causas se deben a la cubierta vegetal, a la cantidad de humedad y por la alteración de la estructura del suelo (SEMARNAT, 2002).

### **2.4 Factores que intervienen en el proceso de erosión hídrica**

Los principales factores que intervienen son: la topografía, el clima, el suelo y la vegetación. Con respecto a la topografía destaca la longitud y el ángulo de inclinación de la pendiente. En el caso del clima influye la precipitación, la temperatura, la humedad del suelo y la radiación solar. En el suelo influye la textura y en el caso de la vegetación disminuye el impacto de las gotas de la lluvia hacia el suelo y también absorbe cierta cantidad del mismo; disminuye la cantidad de la escorrentía y evita que el suelo desprendido no se erosione (Almorox Alanso *et al.*, 2010).

### **2.5 Métodos para la estimación de la erosión**

De acuerdo a Peláez (2001) se utilizan dos métodos que son métodos indirectos y métodos directos. En el caso de los métodos indirectos son los modelos que se han desarrollado para la estimación de la erosión hídrica y para los métodos directos son los estudios experimentales. En el caso de los modelos, los más utilizados son el modelo de Fournier (1960), método SLEMSA que fue desarrollado para las tierras surestes de África y la ecuación universal de pérdida de suelo (USLE).

Para el caso de métodos experimentales destacan las mediciones de las variaciones del nivel superficial, de los cuales destacan las estacas o clavos y los marcos de medición. Las estacas de erosión o clavos es el método más utilizados, ya que este tipo de medición se puede aplicar a varios tipos de suelo, desde muy profundos a pocos profundos, por lo que el tamaño de las estacas o clavos dependerán del tipo de suelo (Peláez, 2001).

Los marcos de medición consisten en colocar dos estacas en un transecto y una estaca arriba de estas. La estaca debe estar agujerada en varias partes, para luego colocar un objeto calibrado en uno de los orificios, el cual indicará la pérdida de suelo.

Para las mediciones de escorrentía superficial destacan las parcelas de escorrentía y las cajas de Gerlach (Peláez, 2001).

## **2.6 Ecuación universal de pérdida de suelo**

Es un modelo diseñado para estimar la erosión hídrica, tomando en cuenta todos los factores físicos que intervienen en la erosión. Sirve para conocer las áreas con mayor tasa de erosión, cuál de los factores contribuye más a la tasa de erosión y también para la implementación de prácticas de conservación de suelo Wischmeier y Smith (1978). Los factores que utiliza este modelo son los siguientes:

$$A = R * K * L * S * C * P$$

Donde:

A: es la pérdida de suelo total (Ton/ha/año)

R: factor erosividad de la lluvia

K: factor erosionabilidad del suelo

L: factor longitud de la pendiente

S: factor ángulo de inclinación de la pendiente

C: factor cobertura del suelo

P: factor prácticas mecánicas de retención del suelo

### 2.6.1 Factor erosividad de la lluvia R

La erosión del suelo en áreas agrícolas está relacionada con el factor R y el tipo de cultivo presente (Ganasri & Ramesh, 2016). El factor de erosividad de la lluvia representa el efecto positivo de la lluvia en la erosión del suelo, por tal motivo los aspectos más importantes de una tormenta son la intensidad y la cantidad de precipitación en determinado tiempo (Wischmeier y Smith, 1978).

De acuerdo a Wischmeier y Smith (1978) este factor representa la capacidad de la lluvia de causar erosión. El método consiste en estimar la energía cinética de la precipitación, la cual es capaz de desegregar el suelo, el cual será transportado por la lluvia. El valor de R es anual por lo que es la suma de las precipitaciones registradas dentro de una superficie determinada. La fórmula para su obtención es la siguiente:

$$R = \sum R_i$$

R = factor de erosividad MJ.mm/ha.h

R<sub>i</sub> = el número de precipitación ocurrida en un año (mm)

E<sub>c</sub> = energía cinética de la precipitación (J)

I<sub>30</sub> = la intensidad máxima de precipitación en un periodo de 30 minutos (mm h<sup>-1</sup>)

Debido a que se carece de este tipo de información, el método más utilizado en México es la aplicación de una de las ecuaciones propuestas por Cortés (Becerra, 1997) (Cuadro 1).

**Cuadro 1** Ecuaciones regionalizadas para la república mexicana (Becerra, 1997), donde P es la precipitación

Región	Ecuación	R <sup>2</sup>
1	1.2078*P+0.002276*P <sup>2</sup>	0.92
2	3.4555*P+0.006470* P <sup>2</sup>	0.93
3	3.6752*P-0.001720* P <sup>2</sup>	0.94
4	2.8959*P+0.002983* P <sup>2</sup>	0.92
5	3.4880*P-0.000188* P <sup>2</sup>	0.94
6	6.6847*P+0.001680* P <sup>2</sup>	0.90
7	(-0.0334)*P+0.0061* P <sup>2</sup>	0.98
8	1.9967*P+0.003270* P <sup>2</sup>	0.98
9	7.0458*P-0.002096* P <sup>2</sup>	0.97
10	6.8938*P+0.000442* P <sup>2</sup>	0.95
11	3.7745*P+0.004540* P <sup>2</sup>	0.98
12	2.4619*P+0.006067* P <sup>2</sup>	0.96
13	10.7427*P-0.001008* P <sup>2</sup>	0.97
14	1.5005*P+0.002640* P <sup>2</sup>	0.95

### 2.6.2 Factor erosionabilidad del suelo K

El factor erosionabilidad del suelo expresa la vulnerabilidad del suelo por susceptibilidad a las tasas de erosión por las características edafológicas como lo es la estructura, la textura, contenido de materia orgánica y permeabilidad del suelo. En si el factor K es la perdida de suelo por fuerza aplicada (Asensio *et al.*, 2012)

Comúnmente este factor se obtiene por la metodología propuesta por Wischmeier y Smith (1978) en el cual utiliza un nomograma generado a partir de datos experimentales de los porcentajes de arena, limo, arcilla, materia orgánica, los códigos de estructura y de permeabilidad (Ganasri & Ramesh, 2016).

$$K=27.66 \times m^{1.14} \times 10^{-8} \times (12-a) + 0.0043 \times (b-2) + 0.0033 \times (c-3)$$

Donde:

K= Factor erosionabilidad del suelo (ton.h/MJ.mm).

m= limo (%) arena (%) arcilla (%).

a= materia orgánica (%).

b =Código de estructura en el que (1) es muy estructurado o particulado, (2) es bastante estructurado, (3) está ligeramente estructurado y (4) es sólido.

c=Código de permeabilidad del perfil en el que (1) es rápido, (2) es moderado a rápido, (3) es moderado, (4) es moderado a lento, (5) es lento, y (6) muy lento.

La metodología propuesta por (Wischmeier y Smith, 1978) no puede ser aplicada para México debido a que se carece de información sobre los porcentajes de materia orgánica, arcilla, limo, arena, estructura y permeabilidad del suelo por lo que se utiliza la metodología propuesta por la Organización de las Naciones Unidas (FAO). Dicha metodología utiliza como base la clave WRB (World Reference Base for Soil Resources) que contiene el tipo de suelo y la textura. Los valores del factor K van a partir de cero que indica poca susceptibilidad a la erosión y uno como muy susceptible a la erosión (Cuadro 2).

**Cuadro 2** Valor K, de acuerdo con el tipo de suelo de la clasificación desarrollada por la WRB, donde G es textura gruesa, M textura media y F textura fina

Orden	Textura			Clasificación WRB	
	G	M	F	Nombre	Símbolo
AC	0.026	0.04	0.013	Acrisol	AC
AL	0.026	0.04	0.013	Albeluvisol	AB
AN	0.026	0.04	0.013	Alisol	AL
AR	0.013	0.02	0.007	Andosol	AN
CH	0.013	0.02	0.007	Anthrosol	AT
CL	0.053	0.079	0.026	Arenosol	AR
CM	0.026	0.04	0.013	Calcisol	CL
DU	0.053	0.079	0.026	Cambisol	CM
FL	0.026	0.04	0.013	Chemozem	CH
FR	0.013	0.02	0.007	Cryosol	CR
GL	0.026	0.04	0.013	Durisol	DU
GY	0.053	0.079	0.026	Ferralsol	FR
HS	0.053	0.02	0.007	Fluvisol	FL
KS	0.026	0.04	0.013	Gleysol	GL
LP	0.013	0.02	0.007	Gypsisol	GY
LV	0.026	0.04	0.013	Histosol	HS
LX	0.013	0.02	0.007	Kastanozem	KS
NT	0.013	0.02	0.007	Leptosol	LP
PH	0.013	0.02	0.007	Lixisol	LX
PL	0.053	0.079	0.026	Luvisol	LV
PT	0.026	0.04	0.013	Nitisol	NT
RG	0.026	0.04	0.013	Phaeozem	PH
SC	0.026	0.04	0.013	Planosol	PL
SN	0.053	0.079	0.026	Plinthosol	PT
UM	0.026	0.04	0.013	Podzol	PZ
VR	0.053	0.079	0.026	Regosol	RG
				Solonchak	SC
				Solonetz	SN
				Umbrisol	UM
				Vertisol	VR

### 2.6.3 Factor longitud de la pendiente L y ángulo de la pendiente S (LS)

El factor longitud de la pendiente (L) se describe como la distancia a partir de donde inicia un escurrimiento y el punto donde este encuentra una desembocadura bien definida. Se interpreta que mientras la longitud de la pendiente aumente mayor será la pérdida de suelo por erosión (Ganasri & Ramesh, 2016).

El factor inclinación de la pendiente S representa la influencia del grado de la pendiente en la pérdida de suelo, por lo que a mayor grado de la pendiente mayor será la erosión (Montes León *et al.*, 2011).

Indica el efecto combinado de la longitud y ángulo de la pendiente sobre la superficie en donde se están estimando las pérdidas del suelo. Wischmeier y Smith (1978) desarrollaron un nomograma que es la base de las metodologías más contemporáneas para el cálculo de este factor.

Debido a que este nomograma se restringe su uso en superficies muy extensas, se desarrollaron fórmulas para el cálculo en superficies de menor extensión. Las fórmulas más utilizadas se representan a continuación:

Factor L

Foster, 1997

$$L = \left( \frac{\lambda}{22.13} \right)^m \quad m = \frac{F}{1+F} \quad F = \frac{\sin \beta / 0.0896}{3(\sin \beta)^{0.8} + 0.56}$$

Con los SIG, Desmet & Gover, Velazquez, 2008

$$L_{(i,j)} = \frac{[A_{(i,j)} + D2]^{(m+1)} - A_{(i,j)}^{(m+1)}}{XmDm+2(22.13)^m}$$

Donde:

$\beta$  = Pendiente a nivel de pixel (debe estar expresada en radianes o grados (multiplicar por 0.01745))

A = Acumulación del flujo a nivel del pixel

D = Tamaño del pixel

X = Coeficiente de forma (x=1 para sistemas pixelados)

Factor S

McCOOLS

Cuando  $\tan \beta_{(i,j)} < 0.09$   $S_{(i,j)} = 10.8 \sin \beta_{(i,j)} + 0.03$

Cuando  $\tan \beta_{(i,j)} \geq 0.09$   $S_{(i,j)} = 16.8 \sin \beta_{(i,j)} - 0.5$

#### **2.6.4 Factor cobertura del suelo C**

Este factor indica el efecto de amortiguamiento de la energía cinética de las gotas de la lluvia de acuerdo al tipo de cubierta vegetal. La metodología aplicada por Wischmeier y Smith (1978) para México no es aplicable, por lo que (Renard, 1997; Becerra 1997; Montes, 2002) indican que se puede utilizar el mapa de uso de suelo y vegetación emitido por INEGI (Cuadro 3).

Otra de las metodologías nuevas es el uso del índice de vegetación normalizado (NDVI) el cual indica la salud de la vegetación. Para tal caso en el cultivo de caña se puede utilizar como factor C debido a que es un cultivo perenne, ya que esa metodología no puede ser aplicada en cultivos que son caducifolios o anuales. Los valores del factor C van de cero que representa una cubierta de suelo al 100 % y uno que representa un suelo desnudo al 100 % (López *et al.*, 2013).

**Cuadro 3** Valores del factor cobertura de suelo (C) por tipo de uso de suelo y vegetación Renard, 1997; Becerra 1997; Montes, 2002

Vegetación y/o uso de suelo	C	Vegetación y/o uso de suelo	C
Bosque de ayarín	0.01	Pastizal gipsófilo	0.25
Bosque de cedro	0.01	Pastizal halófilo	0.25
Bosque de encino	0.10	Pastizal inducido	0.02
Bosque de encino-pino	0.01	Pastizal natural	0.07
Bosque de galería	0.10	Popal	0.85
Bosque de oyamel	0.01	Pradera de alta montaña	0.05
Bosque de pino	0.01	Sabana	0.54
Bosque de pino-encino	0.01	Sabanoide	0.54
Bosque de táscate	0.01	Selva alta perennifolia	0.45
Bosque de mesófilo de montaña	0.01	Selva alta subperennifolia	0.45
Chaparral	0.65	Selva baja caducifolia	0.50
Manglar	0.10	Selva baja espinosa caducifolia	0.50
Matorral crasicáule	0.65	Selva baja espinosa subperennifolia	0.50
Matorral de coníferas	0.20	Selva mediana caducifolia	0.45
Matorral desértico micrófilo	0.25	Selva mediana perennifolia	0.45
Matorral desértico roetófilo	0.25	Selva mediana subcaducifolia	0.45
Matorral espinoso tamaulipeco	0.45	Tular	0.10
Matorral rosetófilo costero	0.25	Vegetación de desiertos arenosos	0.85
Matorral sacocáule	0.25	Vegetación de dunas costeras	0.85
Matorral sarco-crasicáule	0.25	Vegetación de galería	0.85
Matorral sarco-crasicáule de neblina	0.25	Vegetación halófila	0.85
Matorral submontano	0.35	Zona urbana	0.01
Matorral subtropical	0.12	Cuerpos de agua	1.00
Mezquital	0.65	Agricultura en riego	0.55
Palmar inducido	0.75	Agricultura de temporal	0.75
Palmar natural	0.75	Agricultura de humedad	0.25

### 2.6.5 Factor prácticas de retención del suelo P

Este factor representa el efecto positivo en la implementación de prácticas de retención del suelo de acuerdo a (Wischmeier y Esmith, 1978) (Cuadro 4).

**Cuadro 4** Valores del factor prácticas de retención de suelo P (Wischmeier y Esmith, 1978)

Pendiente (%)	Cultivo a nivel	Cultivos en fajas	Terrazas	
			a	b
1-2	0.60 (L<400)	0.30	0.12	0.05
3-8	0.50 (L<200)	0.25	0.10	0.05
9-12	0.60 (L<120)	0.30	0.12	0.05
13-16	0.70 (L<80)	0.35	0.14	0.05
17-20	0.80 (L<60)	0.40	0.16	0.06
21-25	0.90 (L<50)	0.45	0.18	0.06

L= longitud de la ladera (en pies); a= terrazas de desagüe encespadas; b=terrazas de infiltración con contrapendientes

## 2.7 Erosión hídrica potencial

Este tipo de erosión considera la tasa máxima de erosión si un suelo se encuentra completamente desnudo y sin prácticas de conservación del suelo, por lo que los factores que más contribuyen en este tipo de erosión son el relieve y la precipitación. En sí, una superficie con un relieve accidentado tendrá una mayor tasa de erosión en comparación con las superficies planas (Osti *et al.*, 2007).

## 2.8 Erosión hídrica actual

Considera todos los factores físicos que intervienen en la erosión hídrica, por lo que se puede decir que es el producto de la erosión hídrica potencial por el factor cubierta de suelo y las prácticas de conservación de suelo (Osti *et al.*, 2007).

## 2.9 Cultivos que contribuyen a la erosión

Algunos cultivos contribuyen a que exista una tasa de erosión mayor debido a la morfología de la planta. Tal es el caso del agave tequilero (*Agave tequilana* F.A.C.Weber) que en las primeras etapas de crecimiento retiene el agua y la conduce a la base de la misma, por lo que el agua que no capta la planta genera una mayor erosión en superficies con pendientes fuertes, caso contrario del maíz y

los pastos que son cultivos donde la erosión se presenta en los primeros días de su etapa de crecimiento, mientras que el agave lo continúa presentando durante todo el ciclo de vida en un porcentaje menor durante la etapa de madurez de la planta, pero aún se sigue presentando erosión (López *et al.*, 2013).

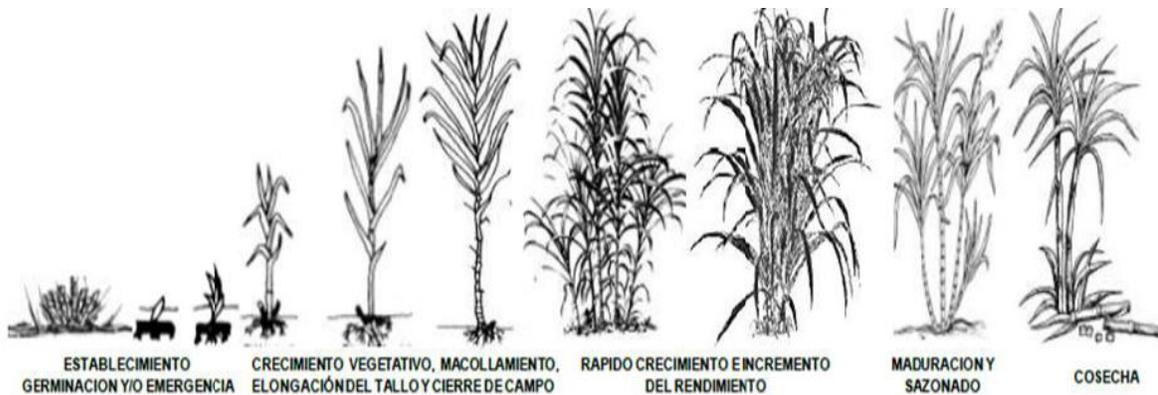
## **2.10 Cultivo de caña de azúcar**

La caña de azúcar (*Saccharum officinarum L*) es originaria de Nueva Guinea, los primeros registros sobre su cultivo se presentan en el sureste Asiático y la India Occidental. Por su parte en México fue introducida en la época de la conquista y el Estado que la utilizó como un cultivo fue Veracruz; en México se distribuye en las zonas tropicales y subtropicales, destacando el Estado de Veracruz con la mayor cantidad de ingenios azucareros y con la tasa más alta de producción.

Los principales usos de la caña son la extracción de sacarosa la cual es procesada para la obtención de azúcar; por su parte algunos subproductos son la melaza que es utilizada para la producción de alcohol y el bagazo, que es utilizado para la fabricación de papel (SAGARPA, 2015).

## **2.11 Fenología de la planta de azúcar**

El tiempo entre la siembra a la cosecha del cultivo puede tardar de 14 a 16 meses y durante este lapso de tiempo pasa por las siguientes etapas: germinación y/o emergencia, amacollamiento o ahijamiento, rápido crecimiento y maduración, (Figura 1). Para el segundo corte puede durar de 11 a 13 meses y las etapas que se distingue son: brotación y amacollamiento, rápido crecimiento y maduración.



**Figura 1** Ciclo biológico del cultivo de caña de azúcar (Allen, 2006)

La germinación y emergencia es cuando los órganos primordios ubicados dentro de la yema pasan de un estado latente y entran a un estado activo de crecimiento y desarrollo, este periodo puede tardar de 7 a 10 días después de la siembra, por lo que el crecimiento inicial puede tardar hasta 35 días (FIRA, 2010).

El amacollamiento o ahijamiento ocurre después de los 35 a 40 días, esta etapa se caracteriza por el brote de varios tallos; este proceso se ve influenciado por la variedad sembrada, el número de días de intensidad luminosa, la temperatura, la humedad del suelo y el nivel de nitrógeno en el suelo. En esta etapa se pueden presentar las raíces adventicias (FIRA, 2010).

En la etapa de rápido crecimiento, como su nombre lo indica, la caña pasa por un proceso de formación y elongación rápida; otra de las características es que la planta alcanza su máxima área foliar y que presenta un buen número de hojas secas. Esta etapa comienza cerca de los 120 días de su plantación y a los 180 días se puede saber el número de tallos que sobrevivieron. Otra característica es que en esta fase la planta requiere de temperaturas mayores a los 30 °C y una buena disponibilidad de nutrientes (FIRA, 2010).

En la etapa de maduración se da el proceso de síntesis y acumulación de la sacarosa en los tallos de la planta, por lo que tiene una duración de 2 a 3 meses y los factores que intervienen en este proceso son la presencia de noches frescas con días calurosos y secos (FIRA, 2010).

En la etapa de la cosecha las principales características son la caída de las hojas secas y que la capa de la corteza se torna quebradiza; para que se llegue a esta etapa transcurre aproximadamente de 11 a 16 meses. También durante esta etapa se hace una quema del cultivo para eliminar todas las malezas y ahuyentar algunos animales que pudieran causar un daño a los cortadores (FIRA, 2010).

## **2.12 Obras de conservación del suelo**

Las obras que se realizan para el control de la erosión en cárcavas son: las presas, entre estas destacan las presas de morillo, presas de ramas, presa de piedra acomodada, presa de geocostales, presa de llantas, presa de mampostería, presa de gaviones; dentro de la erosión en cárcavas también se encuentran las obras en taludes, de las cuales destacan el cabeceo de cárcavas, estabilización de taludes, protección y conservación de caminos (Cardoza Vázquez *et al.*, 2007).

De las obras que se realizan para contrarrestar la erosión laminar en terrazas son las terrazas de muro vivo, terrazas de formación sucesiva, terrazas individuales, barreras de piedra en curvas de nivel. También destacan las zanjas; las que más se practican en México son: zanjas trincheras, sistemas de zanja bordo, zanjas derivadoras de escorrentía, bordos en curvas de nivel y roturación (Cardoza Vázquez *et al.*, 2007).

El objetivo de realizar estas prácticas de retención del suelo es reducir la velocidad de la escorrentía, impedir el crecimiento de las cárcavas, proteger obras de infraestructura (caminos), retener azolves y controlar la erosión (Cuevas *et al.*, 2004).

## **2.13 Estudios realizados**

Un estudio realizado por Aguilar (2015) en el estado de Chiapas, aplicando este modelo, reportó una erosión hídrica potencial (EHP) de 26,481.79 ton/ha/año y una erosión hídrica actual de 131.9 ton/ha/año; para la erosión hídrica potencial no se considera el factor de cobertura de suelo y tampoco las prácticas mecánicas, mientras que en la erosión hídrica actual sí se considera la cobertura vegetal y las prácticas mecánicas, por lo que se distingue la importancia de un

suelo con cobertura vegetal, ya que esto ayuda a la disminución de la erosión, como se puede observar en los resultados de este estudio.

Aplicando este mismo método en el municipio de Saltillo, Coahuila (Ortiz, 2014) obtuvo una erosión hídrica potencial (EHP) de 8,496.3431 ton/ha/año y una erosión hídrica actual (EHA) de 3.50 ton/ha/año; estos resultados indican que no existe un problema grave a comparación con el trabajo de Aguilar (2015); cabe mencionar que en este segundo trabajo se obtienen estos resultados debido a que el terreno se encuentra con pendientes pocas pronunciadas a comparación del estudio anterior, que presenta pendientes pronunciadas de hasta un 70%.

Por su parte Ganasri & Ramesh (2016) aplicando el mismo método en la cuenca Nethravathi ubicada en la India, se obtuvo una erosión hídrica potencial de 473,339 ton/ha/año y una erosión hídrica actual de 441,870 ton/ha/año. Estos resultados se deben a que en el periodo del 2000 a 2003 se construyeron presas ventiladoras por todo el Rio Nethravathi lo cual contribuyó a una disminución del arrastre de sedimentos. Al utilizar las imágenes satelitales se obtuvo una erosión hídrica actual de 488,012.6 ton/ha/año y comparándola con la erosión hídrica potencial, se observó un incremento de 3.1 %, en el cual se puede mencionar la importancia del uso de teledetección, ya que representa el efecto del incremento del uso del suelo o expansión de la agricultura.

## III MATERIALES Y MÉTODOS

### 3.1 Ubicación geográfica

El estudio se realizó en la región cañera ubicada en la subcuenca Pujiltic dentro del Estado de Chiapas, México. Se encuentra dentro de las coordenadas 16°21'20" de latitud Norte y 92°22'02" de longitud Oeste a una altitud de 1297 msnm.

### 3.2 Hidrología

La subcuenca Pujiltic se encuentra en la Región Hidrológica Grijalva-Usumacinta (RH30). Alrededor del área de estudio se encuentran cuerpos de agua permanentes como es el caso de la Angostura (INEGI, 2007).

### 3.3 Geología

La subcuenca Pujiltic está conformada por rocas de tipo Caliza, Limolita-Arenisca, Lutita-Arenisca y Limolita-Arenisca; generadas a partir del periodo Mesozoico y Cenozoico (INEGI, 2002).

### 3.4 Edafología

Presenta suelos de tipo Acrisol, Leptosoles, Luvisol, Regosol y Vertisol, con texturas fina, gruesa según la carta edafológica (INEGI, 1995).

### 3.5 Clima

El clima que predomina es Cálido subhúmedo A (w), temperatura media anual mayor de 22°C y temperatura del mes más frío mayor de 18°C. Precipitación del mes más seco menor de 60 mm; lluvias de verano con índice P/T entre 43.2 y 55.3 y porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% del total anual.

El que menos predomina es clima Templado C (w), subhúmedo, temperatura media anual entre 12°C y 18°C, temperatura del mes más frío entre -3°C y 18°C y temperatura del mes más caliente bajo 22°C. Precipitación en el mes

más seco menor de 40 mm; lluvias de verano con índice P/T mayor de 55 y porcentaje de lluvia invernal del 5 al 10.2% del total anual (Enriqueta, 1998).

### **3.6 Vegetación**

La subcuenca Pujiltic presenta vegetación de bosque de encino con una superficie de 17,705.04 ha que representa el 29 % de la superficie total; bosque de pino-encino con una superficie 5,330.61 ha que representa el 9 % de la superficie total y selva baja caducifolia 37,055.79 ha que representa el 62 % de la superficie total (INEGI, 2016).

Las principales actividades agrícolas son agricultura de riego anual con una superficie de 34.71 ha que representa el 0.02 % de la superficie total; agricultura de riego anual y semipermanente con una superficie de 968.34 ha que representa el 0.58 %; agricultura de riego semipermanente con una superficie de 31,317.93 ha que representa el 18.89 % de la superficie total.

También predomina la agricultura temporal anual con una superficie de 96,560.24 ha que representa el 58.24 % y agricultura de temporal anual y permanente con una superficie de 254.41 ha que representa el 0.15 % de la superficie total (INEGI, 2016).

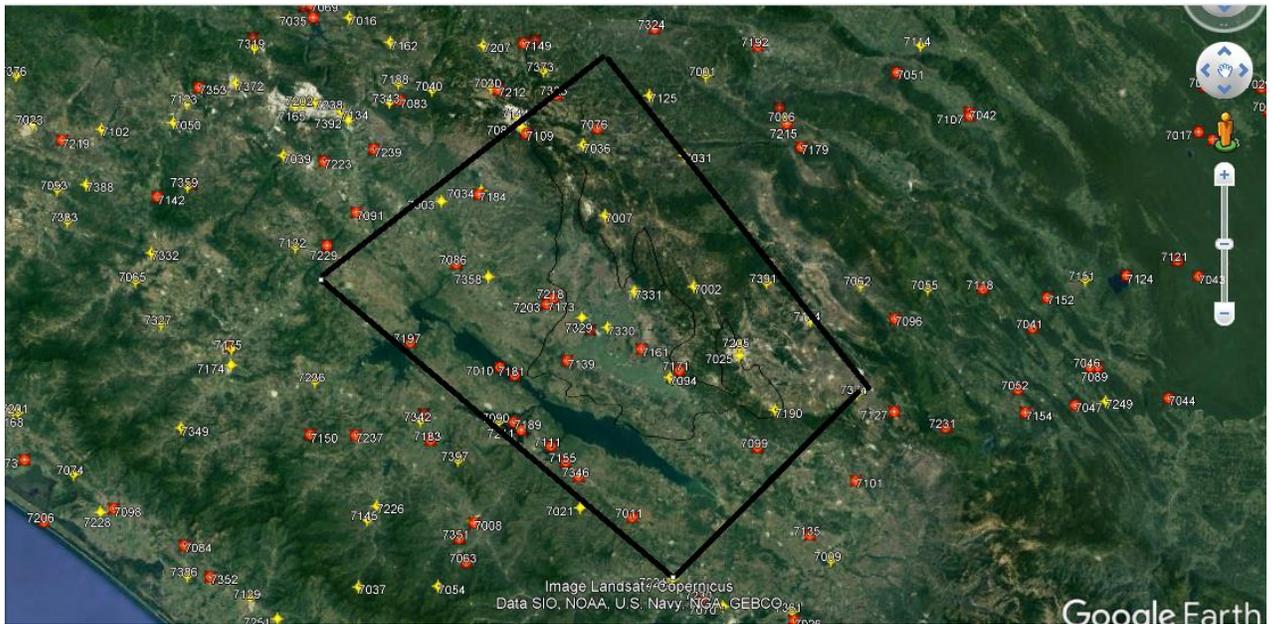
### **3.7 Metodología para el cálculo de los parámetros de la Ecuación Universal de pérdida de suelo revisada RUSLE**

#### **3.7.1 Factor erosividad de la lluvia (R) en mj.mm/ha.h**

Para la determinación de este factor se utiliza la intensidad máxima de la lluvia en un lapso de 30 min, siguiendo el procedimiento sugerido se descargó del portal de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) los datos de precipitación de 35 estaciones meteorológicas, de las cuales se capturaron las normales climatológicas del periodo 1951-2010 (Figura 2).

La ecuación de Cortés (Becerra, 1997) diseñada para un régimen de precipitación media anual, se adaptó para determinar el factor de la erosividad de

la lluvia en periodos mensuales, para determinar el efecto del cultivo de caña de azúcar acorde al ciclo biológico.



**Figura 2** Estaciones meteorológicas utilizadas para generar el raster del factor erosividad de la lluvia R

Una vez generada la base de datos de las estaciones meteorológicas, se aplicó la ecuación 12 de erosividad de la lluvia propuesta por Cortés (Becerra, 1997), Cuadro 2.1.

Ecuación 12 aplicada:

$$R = 2.4619 * P + 0.006067 * P^2$$

Donde P es la precipitación media mensual.

Se realizó una interpolación para cada mes en el software ArcMap 10.3 utilizando la columna erosividad de la lluvia (Factor R) como dato de interpolación mediante la herramienta Kriging.

Estas interpolaciones se generaron para los meses enero, febrero, marzo, abril, mayo, julio, agosto, octubre, noviembre, diciembre del año 2018 y el resultado de esto son 10 mapas del factor erosividad de la lluvia R.

### **3.7.2 Factor de erosionabilidad del suelo (K) ton.h/MJ.mm**

Para generar el raster del factor K se utilizó la siguiente metodología: se descargó la capa edafológica del portal de INEGI y se realizó un corte con el polígono de la subcuenca Pujiltic; posteriormente con la herramienta dissolve, se eliminó la columna "Clave\_WRB", que contiene información sobre los tipos de suelos, para luego convertir la tabla de atributos de este nuevo polígono a un formato Excel.

En el archivo Excel se agregaron los valores del factor K de acuerdo al tipo de suelo y la textura (FAO, 2006). Posteriormente se anexaron los valores del factor K a la tabla de atributos del polígono que contiene información edafológica de la subcuenca Pujiltic

Por último, de la tabla de atributos del polígono con información del factor erosionabilidad del suelo K se generó un Raster utilizando los valores de la columna factor K para la conversión. Cabe mencionar que este mapa de erosionabilidad del suelo se aplicó para cada mes.

### **3.7.3 Factor longitud y ángulo de inclinación de la pendiente LS**

En la generación del Raster del factor topográfico se utilizó la siguiente metodología: se descargó el modelo digital del terreno (MDT) de la página oficial de INEGI con un tamaño de celda de 15.20 m, para luego cortarlo con el polígono subcuenca Pujiltic. En ArcMap se aplicó un relleno de imperfecciones al MDT con la herramienta Fill (módulo de hidrología). Luego se generó un mapa de pendientes en porcentajes; este mapa se utilizó como el valor de "beta" (Cuadro 3.1). Posteriormente se generó un mapa con valores del factor F y factor M.

Después de estos cálculos se derivó la cubierta de dirección de flujo y una de acumulación de flujo (módulo de hidrología). Por último, se generaron los raster del factor topográfico L y S, para luego ser multiplicados; En el (Cuadro 5) se presentan las fórmulas utilizadas en la calculadora de mapas. Cabe mencionar que este mapa con valor del factor LS se aplicó para cada mes.

**Cuadro 5** Desarrollo de fórmulas para el factor longitud de la pendiente (L) y ángulo de la pendiente (S) en la calculadora de mapas

Nombre del factor	Fórmula aplicada
Factor "F"	$((\text{Sin}(\text{"slope"}*0.01745) / 0.0896) / (3*\text{Power}(\text{Sin}(\text{"slope"}*0.01745),0.8) + 0.56))$
Factor "M"	Factor f/ (1+factor f)
Factor "L"	$(\text{Power}(\text{"acumulacion"}+15.20*15.20,\text{"M"}+1)-\text{Power}(\text{"acumulacion"},\text{"M"}+1)) / (\text{Power}(15.20,\text{"M"}+2) * \text{Power}(22.13,\text{"M"}))$
Factor "S"	$\text{Con}(\text{Tan}(\text{"slope"}*0.01745) < 0.09, 10.8*\text{Sin}(\text{"slope"}*0.01745) + 0.03, 16.8*\text{Sin}(\text{"slope"}*0.01745)-0.5)$
Factor "LS"	(Factor "L")* (Factor "S")

Fórmulas utilizadas.

Factor L

Foster, 1997

$$L = \left( \frac{\lambda}{22.13} \right)^m \quad m = \frac{F}{1+F} \quad F = \frac{\sin \beta / 0.0896}{3(\sin \beta)^{0.8} + 0.56}$$

Con los SIG, Desmet & Gover, Velazquez, 2008

$$L_{(i,j)} = \frac{[A_{(i,j)} + D2]^{(m+1)} - A_{(i,j)}^{(m+1)}}{XmDm+2(22.13)^m}$$

Donde:

$\beta$  = Pendiente a nivel de pixel (debe estar expresa en radianes o grados (multiplicar por 0.01745).

A = Acumulación del flujo a nivel del pixel.

D = Lado del pixel.

X = Coeficiente de forma (x=1 para sistemas pixelados).

Factor S

McCOOLS

Cuando  $\tan \beta_{(i,j)} < 0.09$   $S_{(i,j)} = 10.8 \sin \beta_{(i,j)} + 0.03$

Cuando  $\tan \beta_{(i,j)} \geq 0.09$   $S_{(i,j)} = 16.8 \sin \beta_{(i,j)} - 0.5$

### 3.7.4 Factor de vegetación y cultivo (C)

Para generar el raster con valor del factor “C” se descargaron imágenes del satélite Europeo Centinelas 2B (Sentinel-2B), libres de nubosidad para cada mes, a excepción de los meses de junio y septiembre, ya que no se pudo disponer de escenas libres de nubosidad. Como la subcuenca Pujiltic está dentro de dos imágenes Sentinel, se realizó una unión con la herramienta Create Raster Catalog.

Una vez unidas las imágenes Sentinel, el siguiente procedimiento fue realizar un corte con el polígono subcuenca Pujiltic, para después generar una imagen compuesta de color natural, con las bandas 4-3-2 con la herramienta Composite Bands para la visualización de la cobertura vegetal.

Una vez que se interpretó la distribución de la cobertura vegetal en la subcuenca Pujiltic se calculó el índice de vegetación normalizada (NDVI) utilizando las bandas 8 (infrarrojo cercano) y 4 (rojo). La fórmula utilizada fue la siguiente:  $NDVI = (B8 - B4) / (B8 + B4)$ .

Los valores que presenta este mapa de NDVI van de -1 a 1 por tal motivo fue necesario realizar una conversión de valores con la siguiente ecuación, para poderla adaptar e interpretar como valores del factor C.

Factor C =  $1.02 - 1.21 * NDVI$

Después se realizó una reclasificación de valores utilizando cuatro categorías. La categoría uno representa los valores más bajos del factor C, los

cuales representan el cultivo de caña maduro y una cubierta del suelo al 100 %. La categoría dos representa el cultivo de caña en su estado de crecimiento rápido. La categoría tres representa el rebrote del cultivo de caña y por último la categoría cuatro representa áreas en donde el cultivo de caña ya ha sido cortado, por lo que el suelo se encuentra totalmente descubierto. Esta categorización se realizó con la herramienta ArcGis Reclassify.

Posteriormente la cubierta Raster se convirtió a un archivo Shapefile ya categorizado mediante la función Raster to Polygon. Por último, se calculó la superficie en ha con ArcMap a través de la tabla de atributos creando una columna nueva "Área ha" y mediante la función Calculate Geometry se obtuvo el área y para finalizar se convirtió en archivo Excel para calcular la superficie por categoría y el porcentaje que representa cada una.

### **3.7.5 Factor de prácticas mecánicas de retención de suelo (P)**

El factor P representa el efecto positivo en la reducción de la erosión del suelo al implementar una práctica de conservación; tales prácticas pueden ¿qué? los cultivos en contorno que se establecen en dirección de las curvas de nivel (Ganasri & Ramesh, 2016).

Para el cálculo de este parámetro se generó un archivo Raster con valor de uno ya que se desconoce de información sobre prácticas de conservación del suelo.

## IV RESULTADOS

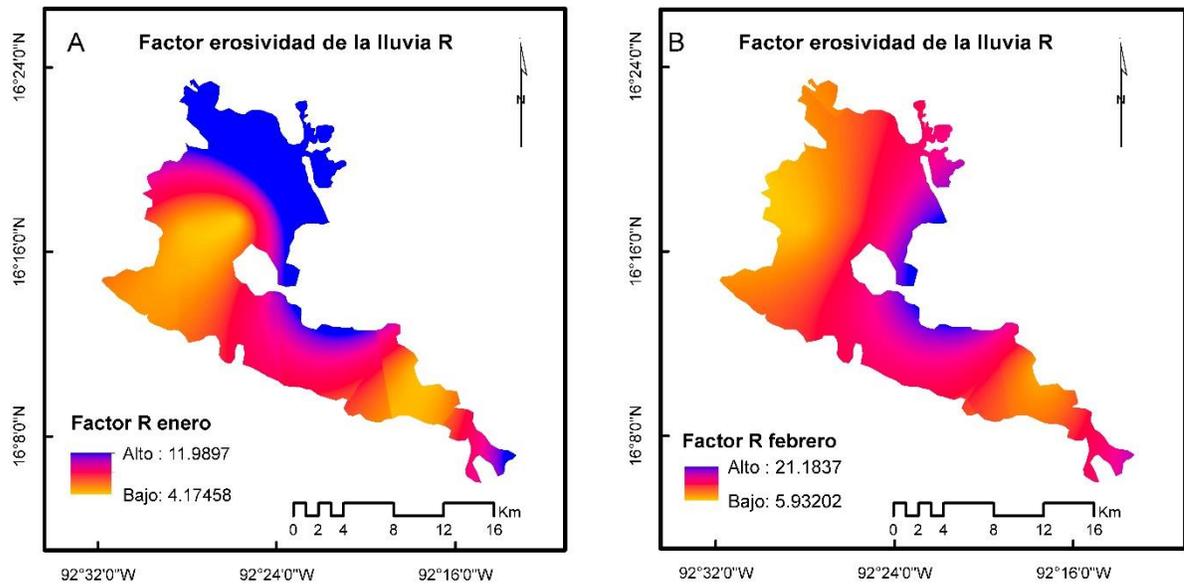
### 4.1 Factor erosividad de la lluvia R

Los meses de diciembre, enero, febrero, marzo y abril presenta una precipitación máxima asociada no mayor a 50.3 mm debido a que es la temporada seca, por lo que existen valores bajos del factor R. Para los meses de mayo, julio, agosto, octubre y noviembre se presentan valores de precipitación máxima asociada de 376.3 mm debido a que es la temporada de lluvia y por tal motivo encontramos valores altos del factor R (Cuadro 6).

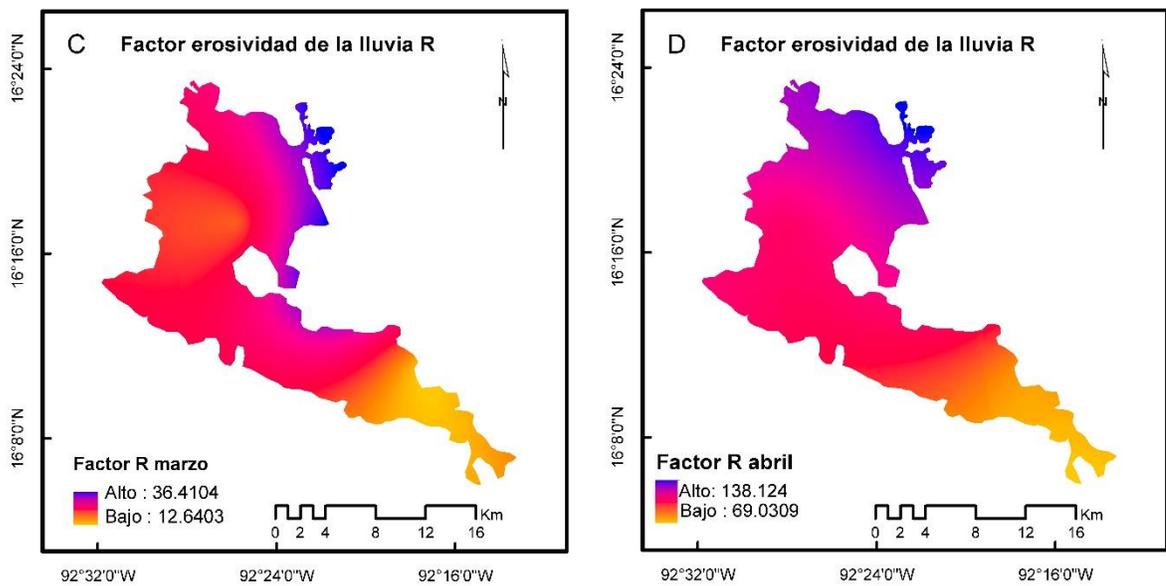
**Cuadro 6** Resultados del factor erosividad de la lluvia R de la subcuenca Pujiltic

Mes	Factor R Mínimo (MJ.mm/ha.h)	Precipitación asociada (mm)	Factor R Máximo (MJ.mm/ha.h)	Precipitación asociada (mm)
Enero	4.17458	1.8	11.9897	5.4
Febrero	5.93202	2.5	21.1837	9.7
Marzo	12.6403	5.1	36.4104	14.3
Abril	69.0309	27.1	138.124	50.3
Mayo	307.82	101.4	757.97	216.6
Julio	531.389	159.2	1480.32	332.8
Agosto	657.898	184.3	1772.51	376.3
Octubre	366.299	118.7	534.895	162.5
Noviembre	47.4654	18.6	121.575	51.2
Diciembre	1.73515	0.97	24.9398	11.1

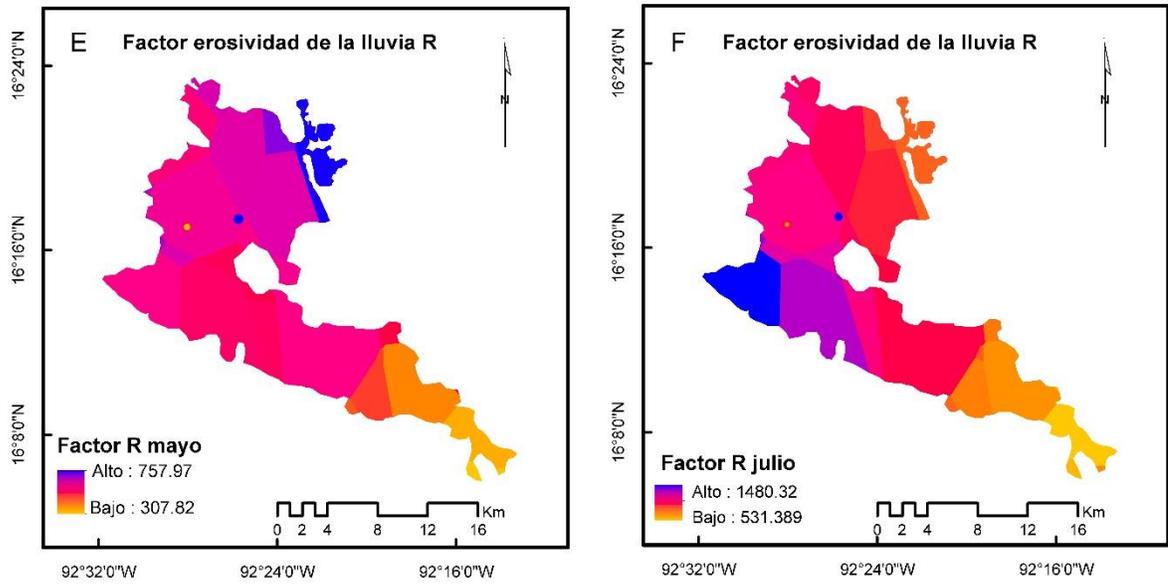
De acuerdo al registro de precipitación, para los meses de mayo, julio, agosto octubre y noviembre no existe una homogeneidad en el régimen de la distribución del factor R (Figuras 5, 6, 7) y para los meses diciembre, enero, febrero, marzo y abril si existe una homogeneidad en el régimen de distribución del factor R (Figuras 3, 4,7).



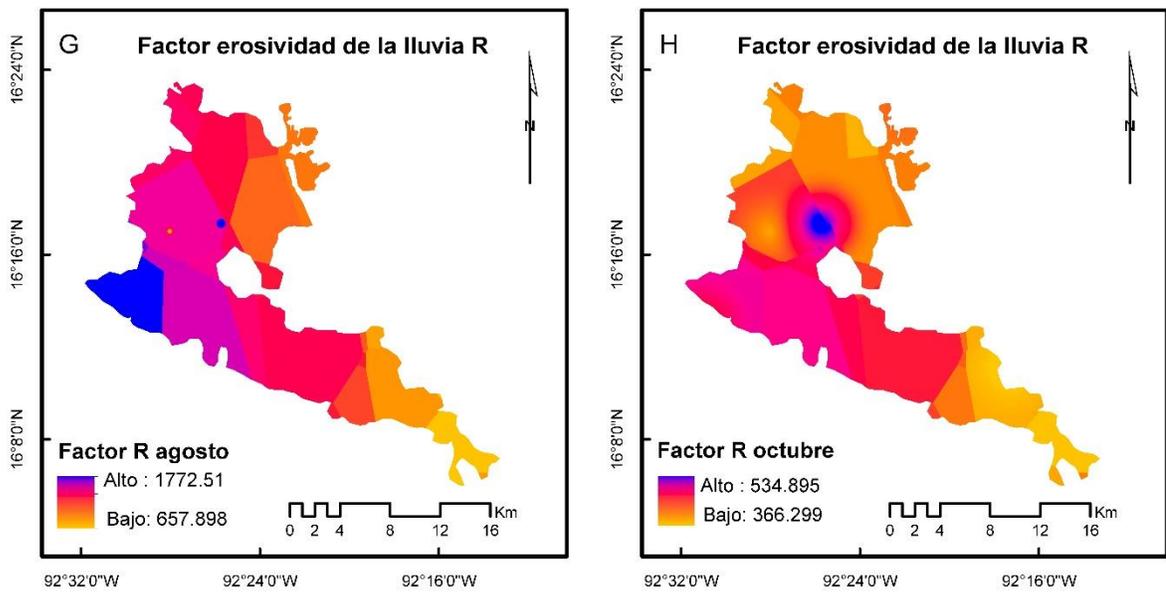
**Figura 3** Factor erosividad de la lluvia R de enero (A) y febrero (B) de la subcuenca Pujilic



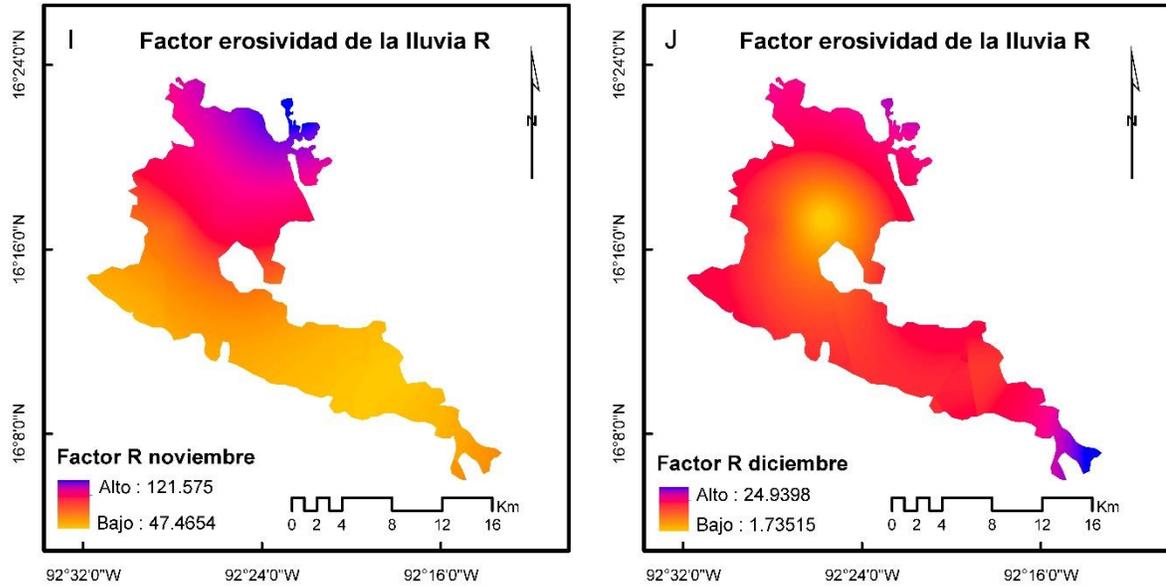
**Figura 4** Factor erosividad de la lluvia R de marzo (C) y abril (D) de la subcuenca Pujilic



**Figura 5** Factor erosividad de la lluvia R de mayo (E) y julio (F) de la subcuenca Pujilic



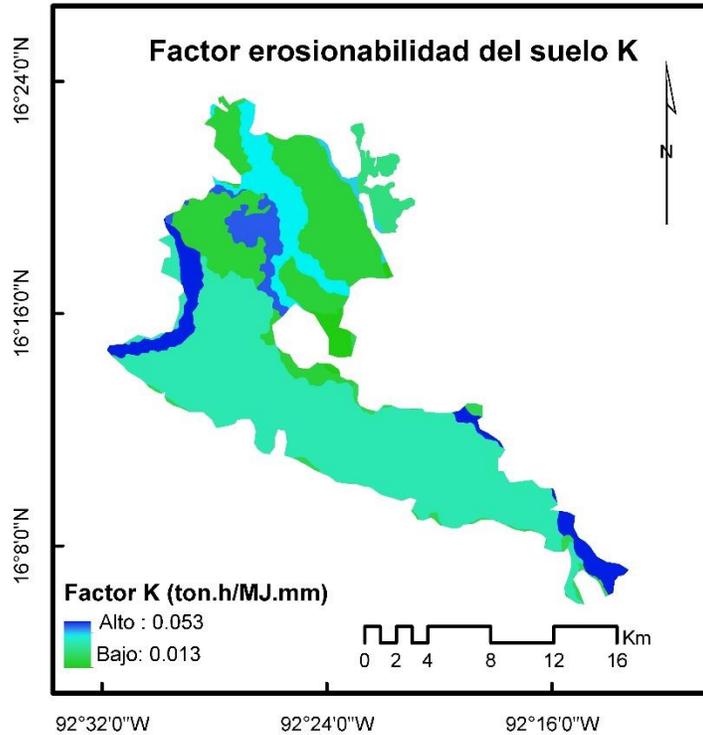
**Figura 6** Factor erosividad de la lluvia R agosto (G) y octubre (H) de la subcuenca Pujilic



**Figura 7** Factor erosividad de la lluvia R de noviembre (I) y diciembre (J) de la subcuenca Pujilic

#### 4.2 Factor erosionabilidad del suelo K

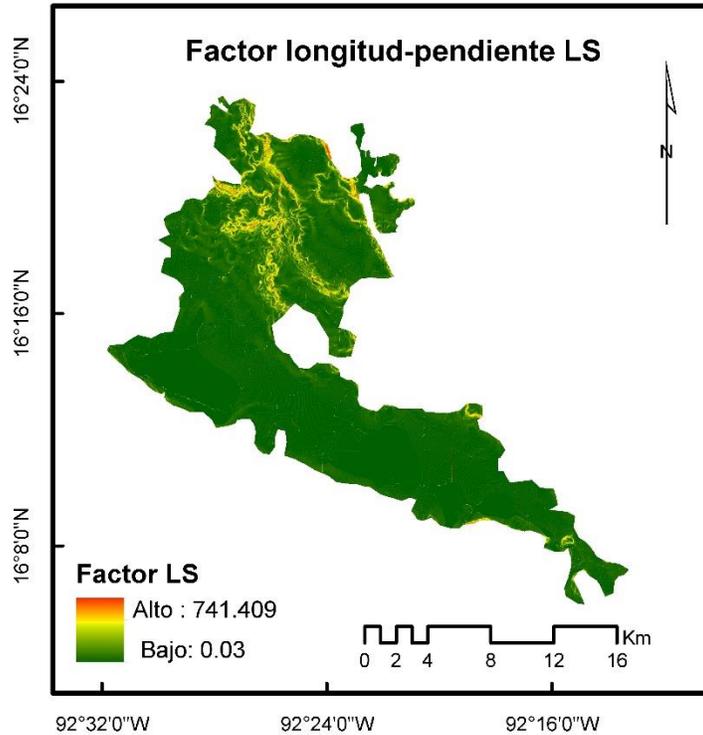
Presenta valores que van de 0.013 hasta 0.0556 (Figura 8). Se puede interpretar que la mayor superficie se encuentra con suelos de alta permeabilidad y con texturas resistentes a las gotas de agua, por tal motivo este factor no representa un riesgo de erosión hídrica.



**Figura 8** Factor erosionabilidad del suelo K de la subcuenca Pujiltic

#### 4.3 Factor longitud y ángulo de inclinación de la pendiente LS

Para el factor LS los valores van de 0.03 para la zona baja y 741.41 para la zona alta. Estos valores están relacionados de acuerdo a la pendiente, esto quiere decir que el valor más alto se encuentra en la zona alta y el valor más bajo en la zona baja o planicie (Figura 9).



**Figura 9** Factor longitud y ángulo de inclinación la pendiente LS de la subcuenca Pujilic

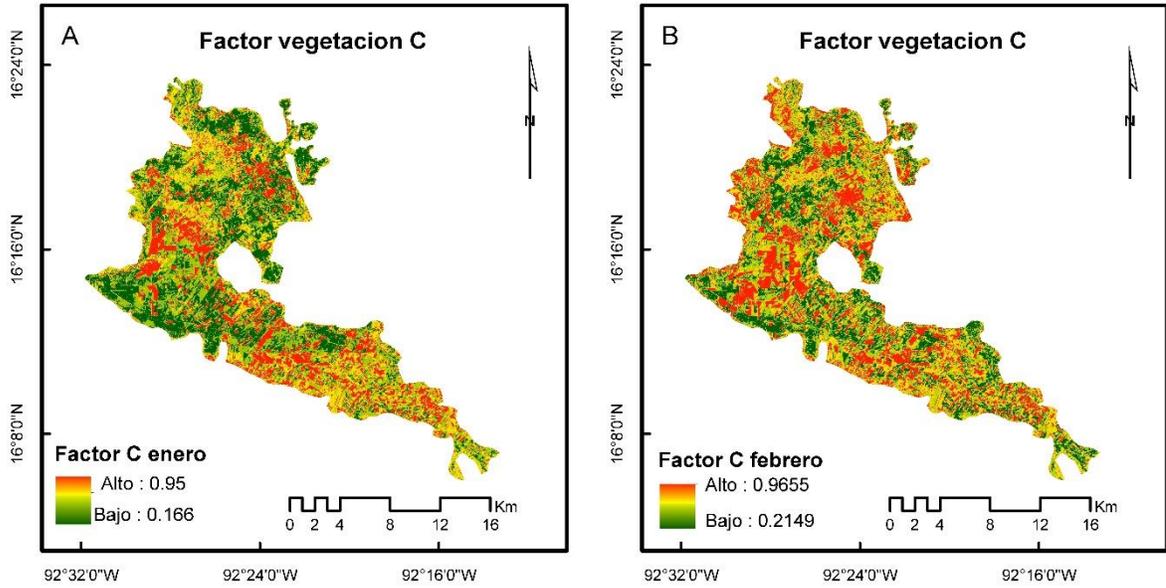
#### 4.4 Factor cubierta del suelo C

De acuerdo a la fisiología del cultivo, el mes de mayo, julio, agosto y octubre representan la etapa de crecimiento rápido, debido a que en estos meses se encontró el valor mínimo de 0.0891 del factor C. Los meses de, noviembre y diciembre representa la etapa de maduración del cultivo, por lo que también presenta un valor mínimo de 0.1155 del factor C. Por último, los meses de enero, febrero, marzo y abril representan la etapa de cosecha del cultivo, por ende el valor alto de 0.2620 del factor C (Cuadro 7).

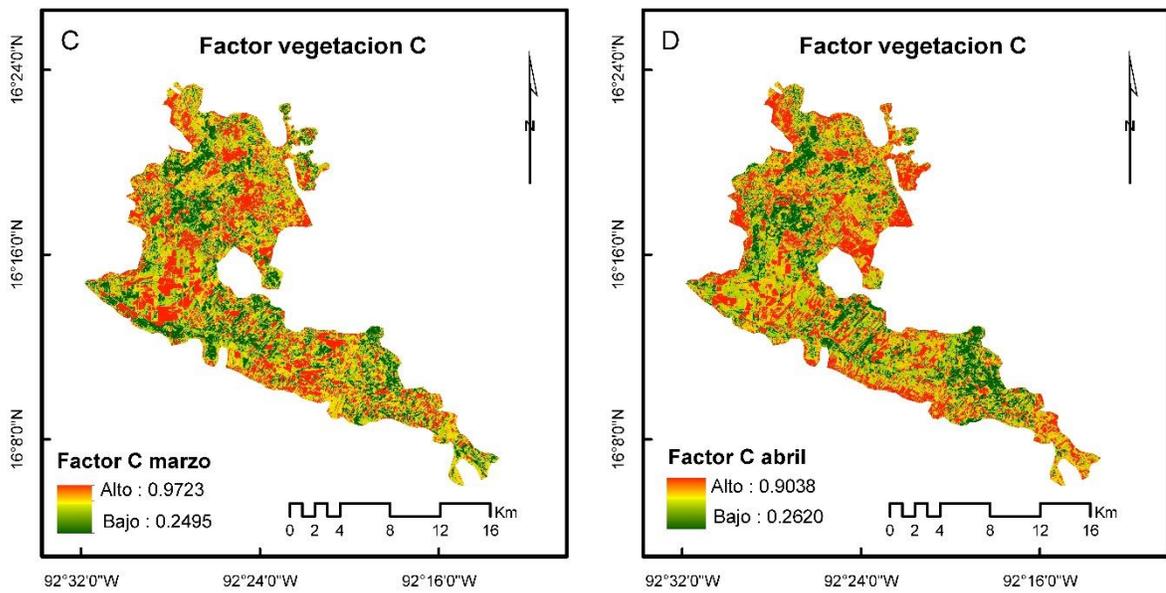
**Cuadro 7** Resultados del factor cubierta de suelo C para cada mes del año 2018, en la Subcuenca Pujiltic

<b>Mes</b>	<b>Factor C</b>	
	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>
Enero	0.166	0.95
febrero	0.2149	0.9655
Marzo	0.2495	0.9723
Abril	0.2620	0.9038
Mayo	0.1451	0.9672
Julio	0.1279	0.9473
Agosto	0.1396	0.9795
Octubre	0.0891	0.9875
Noviembre	0.1155	0.9999
Diciembre	0.1724	0.9866

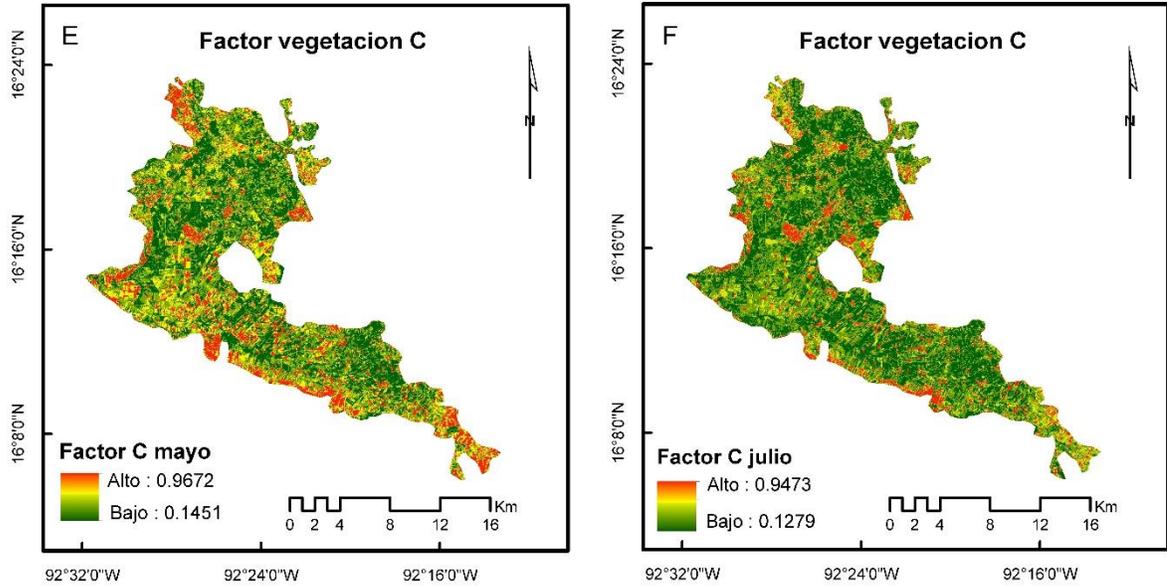
Se puede interpretar a partir del mes de, diciembre, enero, febrero, marzo y abril se tiene una mala cubierta vegetal debido a la temporada de corta de la caña (Figuras 10, 11, y 14). A partir del mes de mayo, julio, agosto, octubre y noviembre se tiene una tasa alta de cubierta de suelo debido a que en es la temporada de crecimiento rápido del cultivo (Figuras 12, 13 y 14).



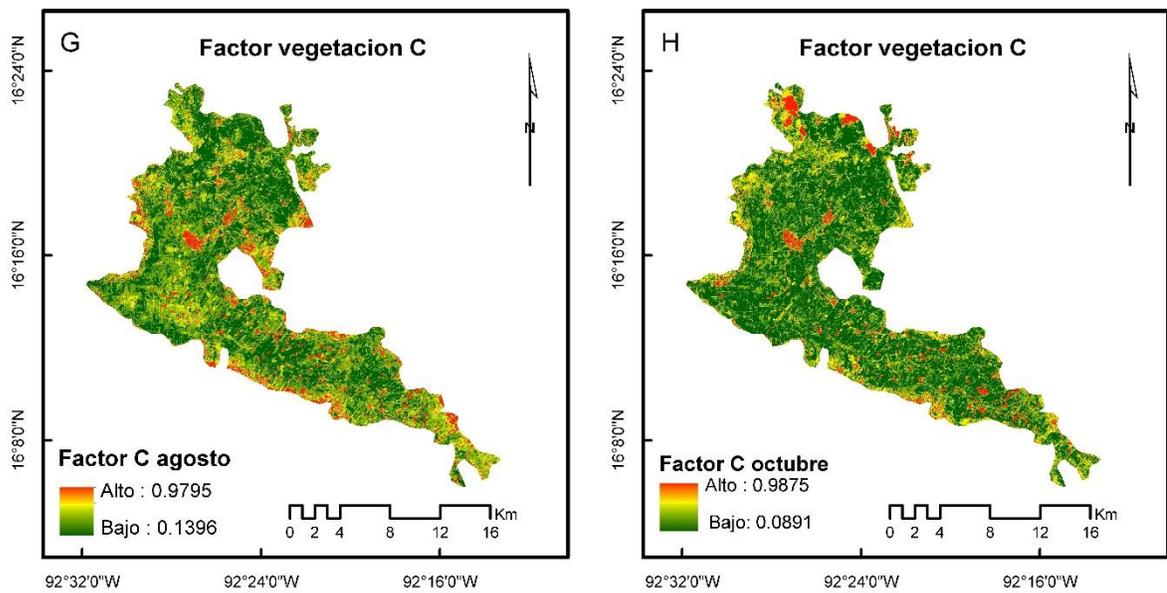
**Figura 10** Factor cubierta de suelo C de enero (A) y febrero (B) de la subcuenca Pujilic



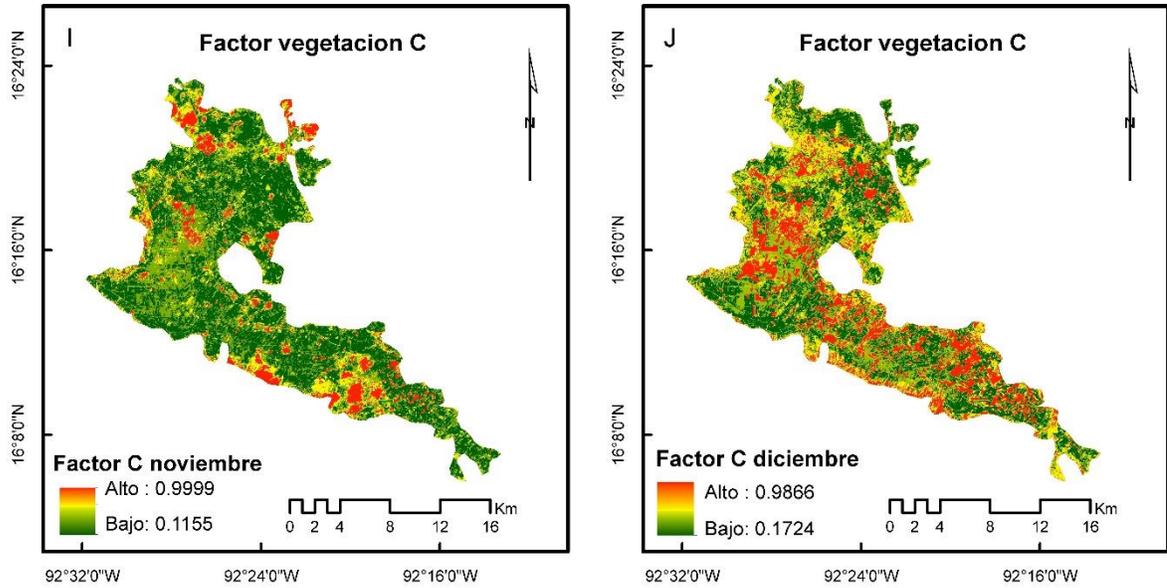
**Figura 11** Factor cubierta de suelo C de marzo (C) y abril (D) de la subcuenca Pujilic



**Figura 12** Factor cubierta de suelo C de mayo (E) y julio (F) de la subcuenca Pujilic



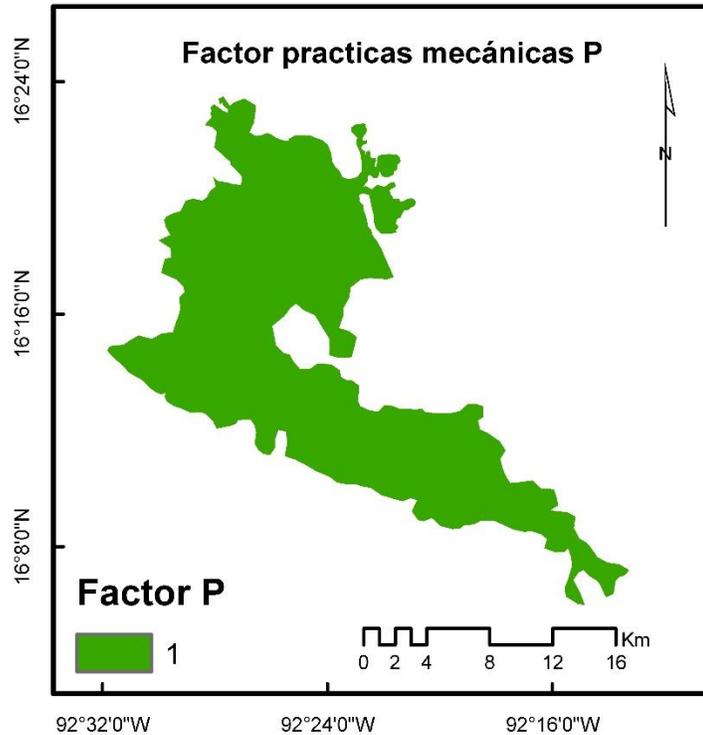
**Figura 13** Factor cubierta de suelo C de agosto (G) y octubre (H) de la subcuenca Pujilic



**Figura 14** Factor cubierta de suelo C de noviembre (I) y diciembre (J) de la subcuenca Pujiltic

#### 4.5 Factor practicas mecánicas P

El factor practicas mecánica presenta valor de uno, ya que no se tienen registros de prácticas de retención del suelo (Figura 15).



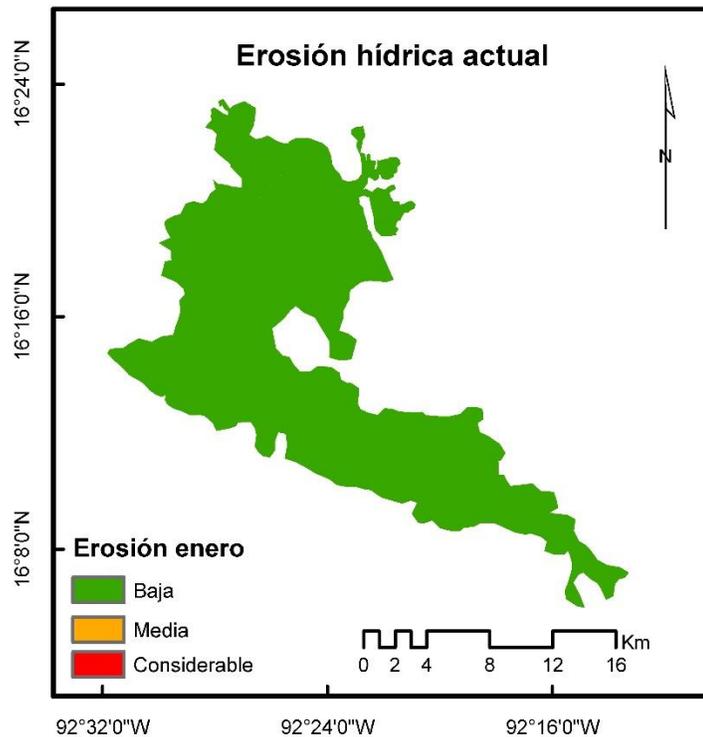
**Figura 15** Factor prácticas mecánicas de retención del suelo P de la subcuenca Pujiltic

#### 4.6 Resultado RUSLE por mes

Enero presenta una tasa de erosión baja, por lo cual podemos decir que en estas fechas el cultivo de caña no contribuye a la erosión, ya que una pequeña superficie presenta erosión media (Cuadro 8). Esto se debe a que en estas fechas hay valores muy bajos de precipitación y porque la mayor parte del cultivo se encuentra en la etapa de cosecha, esto quiere decir que tiene una buena cubierta de suelo, por lo que las pocas precipitaciones que se dan no se ve su efecto en comparación a otras etapas del cultivo. Para un mayor entendimiento el color verde indica superficies con bajas tasas de erosión, el amarillo indica erosión media y el color rojo indica erosión alta (Figura 16).

**Cuadro 8** Tasa de erosión mediante método RUSLE para el mes de enero de la subcuenca Pujiltic

Categoría	Superficie (ha)	Porcentaje (%)	Clasificación
1	30681.708	99.9990	Baja
2	0.25790151	0.0008	Media
3	0.04622706	0.0002	Considerable
<b>Total general</b>	<b>30682.0122</b>	<b>100</b>	



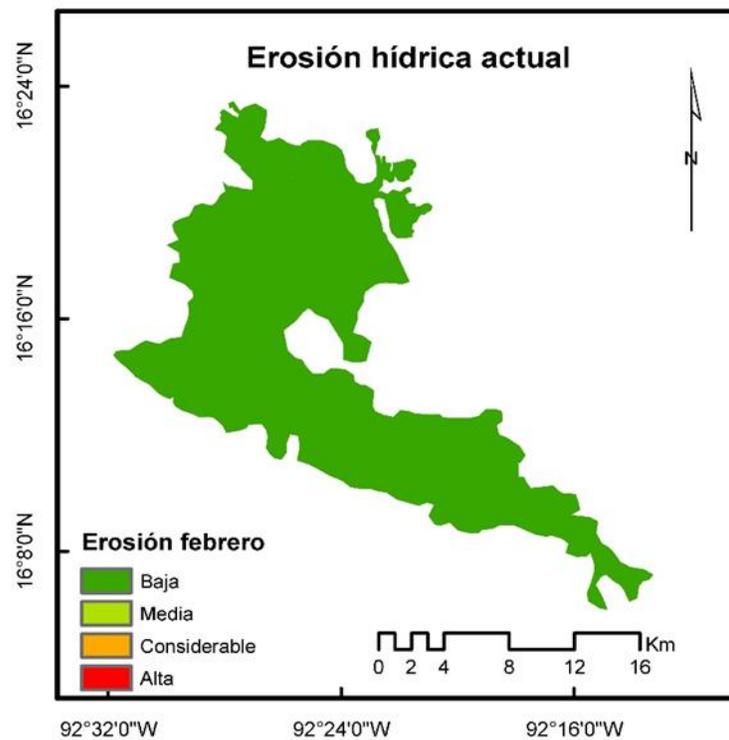
**Figura 16** Tasa de erosión hídrica mediante método RUSLE para el mes de enero de la subcuenca Pujiltic

Para el mes de febrero se puede apreciar que la mayor parte de la superficie presenta una tasa de erosión baja, pero también existe una pequeña superficie con erosión media, considerable y alta (Cuadro 9); la presencia de erosión alta se debe a que en este mes se presentan precipitaciones mayores al mes de enero, por lo que se puede ver el pequeño efecto de la precipitación y también se debe a que en este mes algunas superficies del cultivo de caña ya han

sido cortados, por lo que el suelo se encuentra completamente desnudo (Figura 17).

**Cuadro 9** Tasa de erosión hídrica mediante método RUSLE para el mes de febrero de la subcuenca Pujiltic

Categoría	Superficie (ha)	Porcentaje (%)	Clasificación
1	30665.2933	99.9989	Baja
2	0.20720394	0.0007	Media
3	0.08414205	0.0003	Considerable
4	0.04622706	0.0002	Alta
<b>Total general</b>	<b>30665.6309</b>	<b>100</b>	



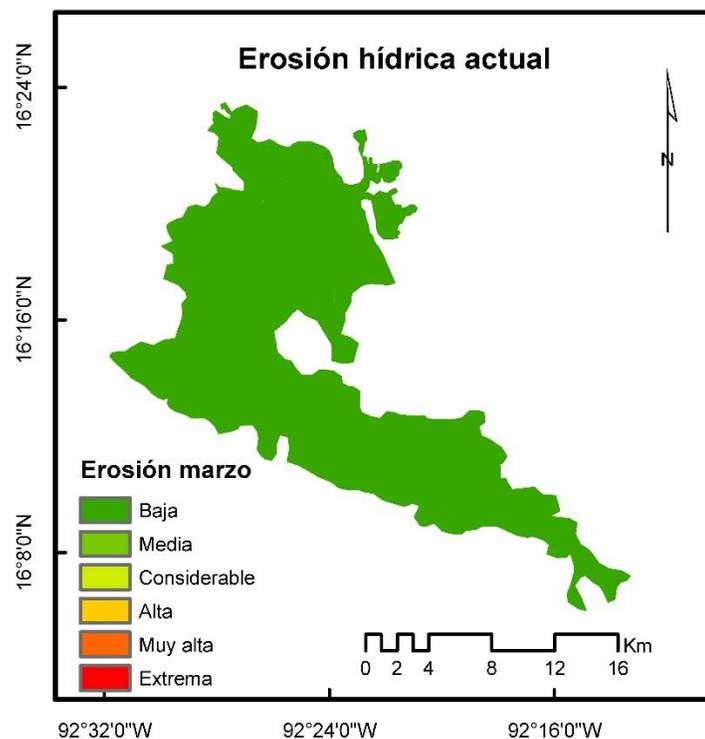
**Figura 17** Tasa de erosión hídrica mediante método RUSLE para el mes de febrero de la subcuenca Pujiltic

Marzo presenta la mayor parte de superficie con erosión baja, pero en ella se encuentra erosión media, considerable, alta, muy alta y extrema en pequeñas superficies (Cuadro 10; Figura 18). Los resultados de este mes se deben principalmente a que en esta fecha la mayor parte de la superficie se encuentra

cosechada y el suelo se encuentra completamente desnudo. También se ve el efecto de la precipitación ya que, en este mes, se tienen registros de precipitaciones máximas de 14.3 mm mayores al mes de enero y febrero.

**Cuadro 10** Tasa de erosión hídrica mediante método RUSLE para el mes de marzo de la subcuenca Pujiltic

Categoría	Superficie (ha)	Porcentaje (%)	Clasificación
1	30677.207	99.9931	Baja
2	1.43887657	0.0047	Media
3	0.35421613	0.0012	Considerable
4	0.1693079	0.0006	Alta
5	0.06934058	0.0002	Muy alta
6	0.09245411	0.0003	Extrema
<b>Total general</b>	<b>30679.3312</b>	<b>100</b>	



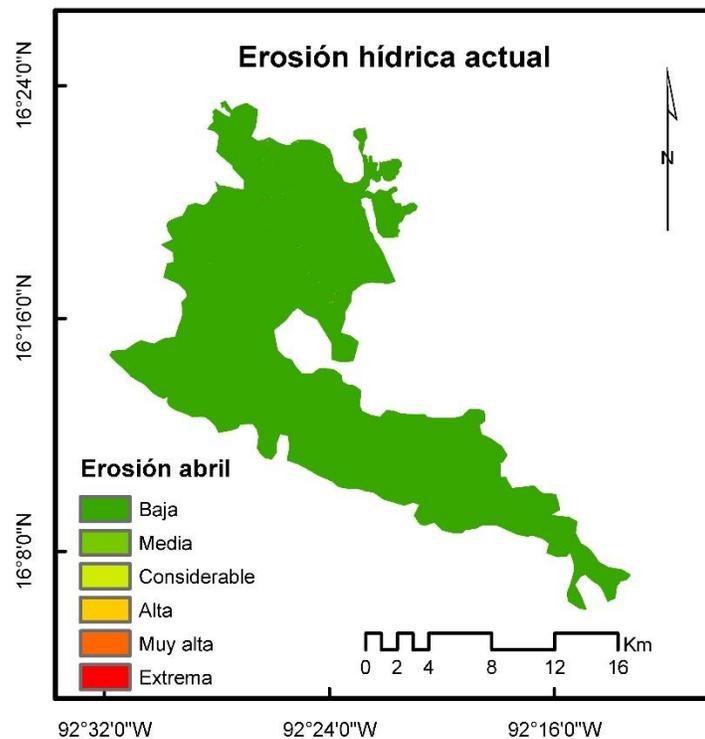
**Figura 18** Tasa de erosión hídrica mediante método RUSLE para el mes de febrero de la subcuenca Pujiltic

Abril presenta erosión baja en la mayoría de superficie, Cuadro 11, pero también se observa media, considerable, alta, muy alta y extrema (Figura 19).

Sumando el resultado de la erosión alta, muy alta y extrema se obtiene una suma de 4.09 ha.

**Cuadro 11** Tasa de erosión hídrica mediante método RUSLE para el mes de abril de la subcuenca Pujiltic

Categoría	Superficie (ha)	Porcentaje (%)	Clasificación
1	30643.9538	99.9576	Baja
2	6.39025704	0.0208	Media
3	2.50192682	0.0082	Considerable
4	1.3928734	0.0045	Alta
5	0.71674402	0.0023	Muy alta
6	1.98317056	0.0065	Extrema
<b>Total general</b>	<b>30656.9388</b>	<b>100</b>	



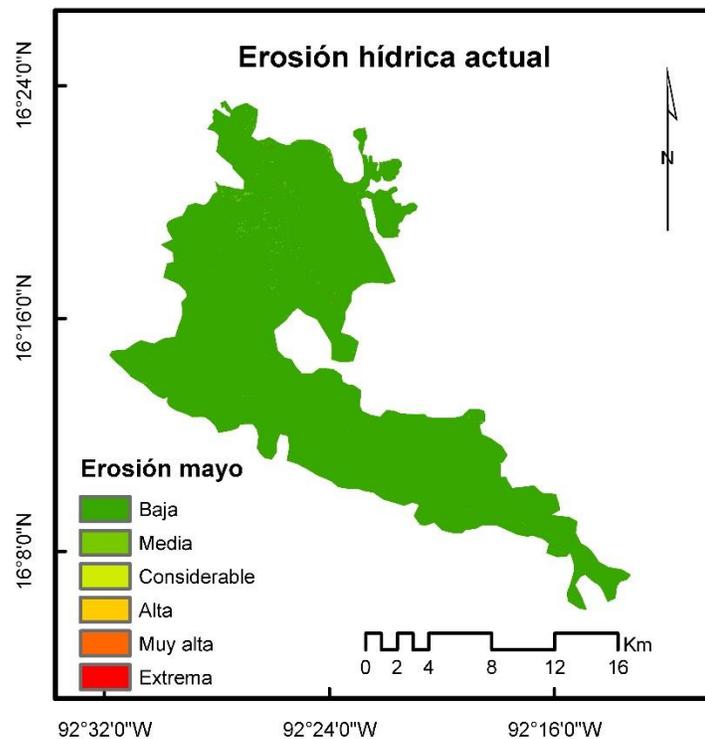
**Figura 19** Tasa de erosión hídrica mediante método RUSLE para el mes de abril de la subcuenca Pujiltic

Mayo presenta erosión baja, media, considerable, alta, muy alta y extrema (Figura 20). Tomando en cuenta la clasificación de alta, muy alta y extrema se

obtiene una suma de 10.10 ha (Cuadro 12). Este aumento de erosión se debe a que comienza la temporada de lluvia.

**Cuadro 12** Tasa de erosión hídrica mediante método RUSLE para el mes de mayo de la subcuenca Pujiltic

Categoría	Superficie (ha)	Porcentaje (%)	Clasificación
1	30591.1461	99.7508	Baja
2	58.5980995	0.1911	Media
3	7.7084476	0.0251	Considerable
4	2.7078856	0.0088	Alta
5	1.87878629	0.0061	Muy alta
6	5.51872293	0.0180	Extrema
<b>Total general</b>	<b>30667.558</b>	<b>100</b>	



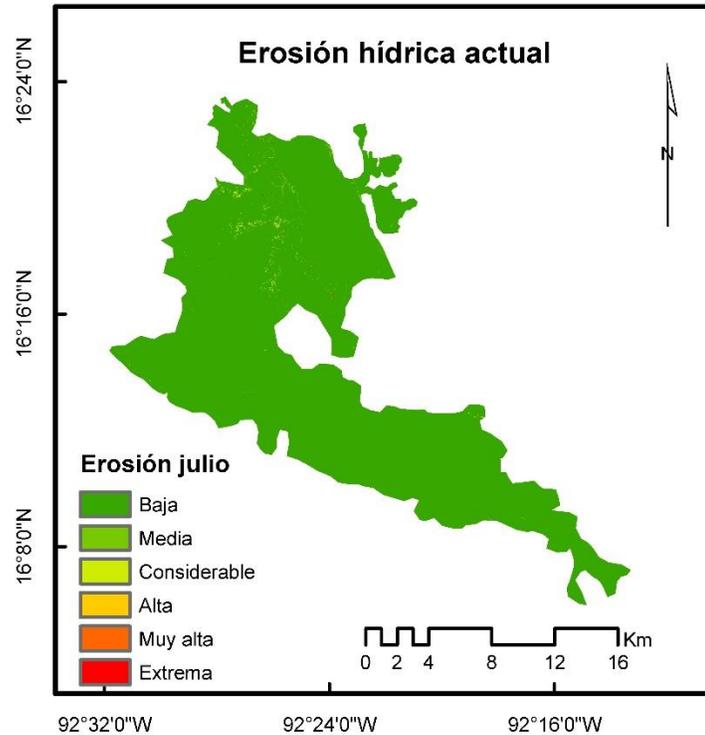
**Figura 20** Tasa de erosión hídrica mediante método RUSLE para el mes de mayo de la subcuenca Pujiltic

El mes de julio presenta los 6 tipos de clasificación de erosión (Figura 21). Las clasificaciones más preocupantes es la erosión alta, muy alta y extrema, ya

que de estos tres obtenemos una suma de 21.82 ha (Cuadro 13). Esto se debe principalmente a la temporada de lluvias, ya que en estas fechas se tienen registros de precipitaciones máxima de 332.8 mm y además porque en esta fecha el cultivo de caña se encuentra en etapa de rápido crecimiento.

**Cuadro 13** Tasa de erosión hídrica mediante método RUSLE para el mes de julio de la subcuenca Pujiltic

<b>Categoría</b>	<b>Superficie (ha)</b>	<b>Porcentaje (%)</b>	<b>Clasificación</b>
1	30438.4946	99.2532	Baja
2	170.259404	0.5552	Media
3	36.9396534	0.1205	Considerable
4	9.84690466	0.0321	Alta
5	2.84135967	0.0093	Muy alta
6	9.13592567	0.0298	Extrema
<b>Total general</b>	<b>30667.5179</b>	<b>100</b>	

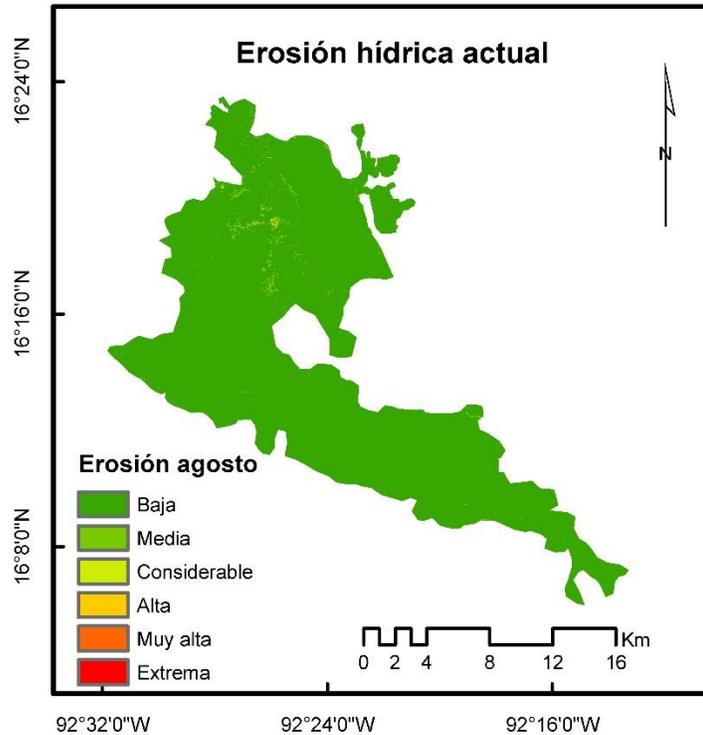


**Figura 21** Tasa de erosión hídrica mediante método RUSLE para el mes de julio de la subcuenca Pujiltic

En agosto encontramos un aumento de superficie de las tres últimas clasificaciones de erosión (Figura 22). Sumándolas se obtiene un valor de 30.77 ha (Cuadro 14). Esto se debe principalmente a los altos registros de precipitación con valores máximos de 376.3 mm.

**Cuadro 14** Tasa de erosión hídrica mediante método RUSLE para el mes de agosto de la subcuenca Pujiltic

Categoría	Superficie (ha)	Porcentaje (%)	Clasificación
1	30360.3046	98.9997809	Baja
2	232.855837	0.75930321	Media
3	43.102478	0.14054984	Considerable
4	14.1735011	0.04621737	Alta
5	5.41472922	0.01765651	Muy alta
6	11.1910723	0.03649218	Extrema
<b>Total general</b>	<b>30667.0422</b>	<b>100</b>	

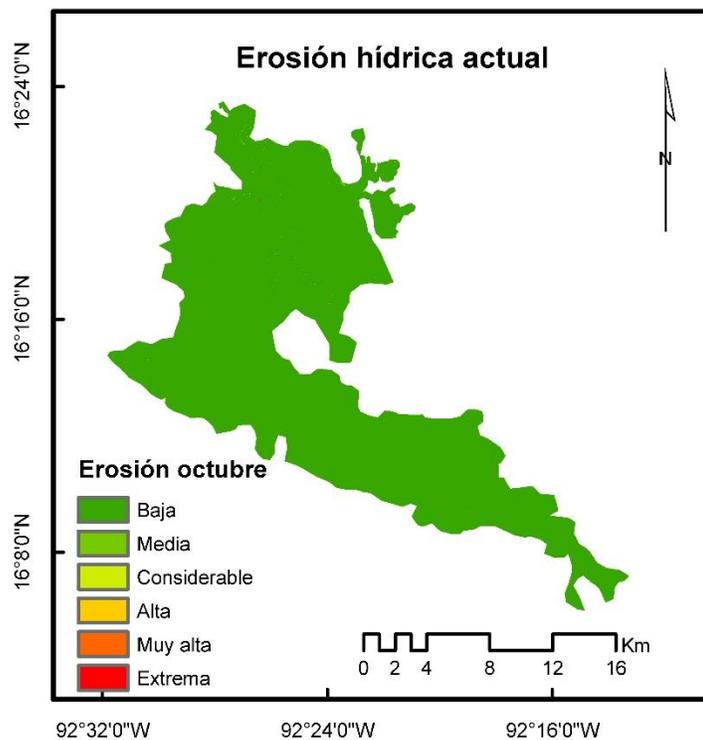


**Figura 22** Tasa de erosión hídrica mediante método RUSLE para el mes de agosto de la subcuenca Pujilic

Octubre presenta erosión baja en la mayor parte de la superficie de estudio (Figura 23). De las 3 categorías más preocupantes se obtiene una suma de 6.28 ha (Cuadro 15). A pesar de que en esta fecha aún continúan las precipitaciones obtenemos una baja de la suma de las tres últimas clasificaciones en comparación con el mes de agosto que se tiene una suma de 30.77 ha; esto se debe principalmente a que el cultivo se encuentra en los inicios de la etapa de madurez.

**Cuadro 15** Tasa de erosión hídrica mediante método RUSLE para el mes de octubre de la subcuenca Pujiltic

Categoría	Superficie (ha)	Porcentaje (%)	Clasificación
1	30649.6343	99.8777	Baja
2	27.4892095	0.0896	Media
3	3.73947602	0.0122	Considerable
4	1.91372995	0.0062	Alta
5	0.99720288	0.0032	Muy alta
6	3.37838575	0.0110	Extrema
<b>Total general</b>	<b>30687.1523</b>	<b>100</b>	



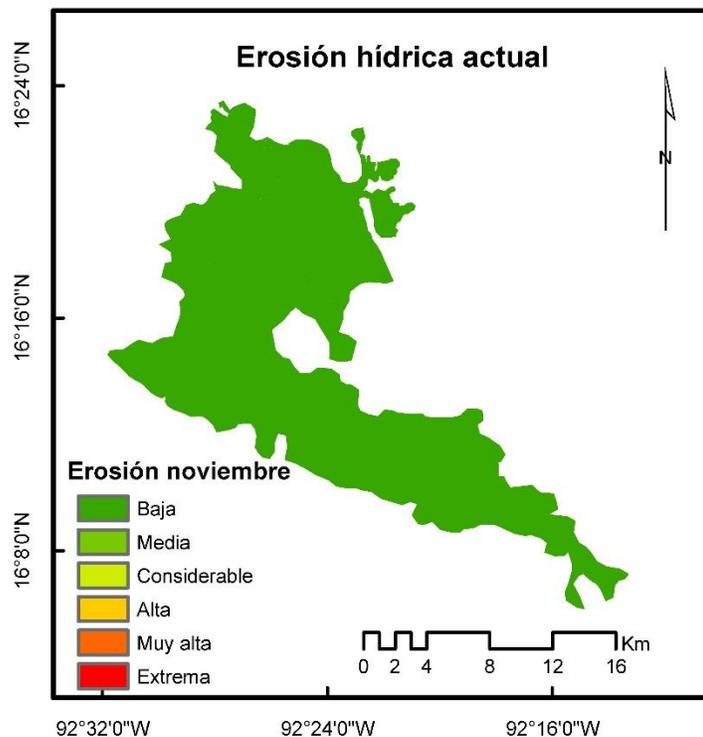
**Figura 23** Tasa de erosión hídrica mediante método RUSLE para el mes de octubre de la subcuenca Pujiltic

Para el mes de noviembre presenta la mayor parte del área con erosión baja (Figura 24). Sumando la superficie de la erosión alta, muy alta y extrema se tiene un valor de 1.53 ha (Cuadro 16). Este resultado se debe principalmente a que en esta fecha el cultivo ya se encuentra en la etapa fenológica de cosecha, en

pocas palabras tiene una buena cobertura vegetal. Otro de los factores que influye en este resultado es la culminación de la temporada de lluvias.

**Cuadro 16** Tasa de erosión hídrica mediante método RUSLE para el mes de noviembre de la subcuenca Pujiltic

Categoría	Superficie (ha)	Porcentaje (%)	Clasificación
1	30663.6969	99.9842	Baja
2	2.39086198	0.0078	Media
3	0.91634309	0.0030	Considerable
4	0.65411774	0.0021	Alta
5	0.40693281	0.0013	Muy alta
6	0.4770722	0.0016	Extrema
<b>Total general</b>	<b>30668.5422</b>	<b>100</b>	



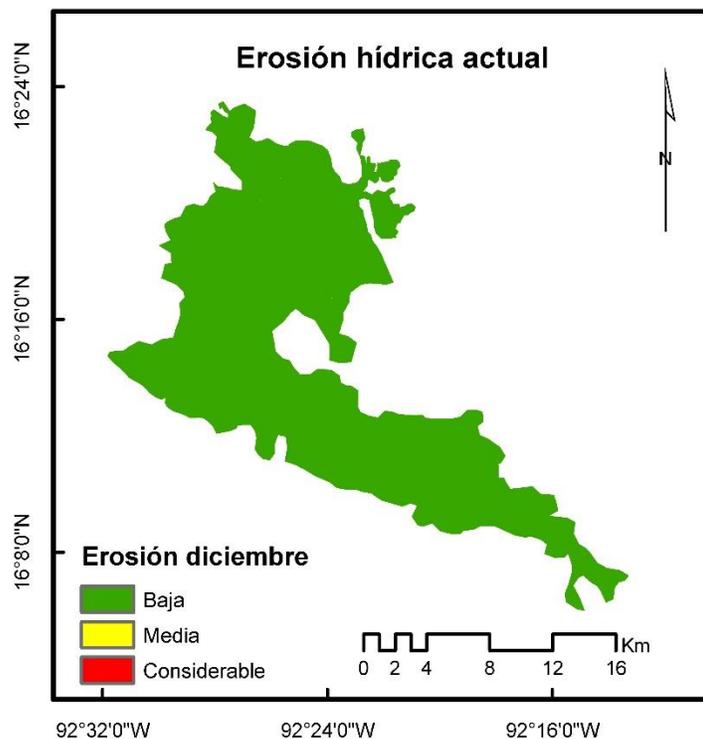
**Figura 24** Tasa de erosión hídrica mediante método RUSLE para el mes de noviembre de la subcuenca Pujiltic

En el mes de diciembre prácticamente toda la superficie de la subcuenca Pujiltic se encuentra dentro de la clasificación baja (Cuadro 17; Figura 25). Este

resultado se debe a las bajas precipitaciones que se tienen registradas y al comienzo de la cortar de la caña.

**Cuadro 17** Tasa de erosión hídrica mediante método RUSLE para el mes de diciembre de la subcuenca Pujiltic

Categoría	Superficie (ha)	Porcentaje (%)	Clasificación
1	30678.7712	99.9993	Baja
2	0.20484582	0.0007	Media
3	0.01480146	0.0000	Considerable
<b>Total general</b>	<b>30678.9909</b>	<b>100</b>	



**Figura 25** Tasa de erosión hídrica mediante método RUSLE para el mes de diciembre de la subcuenca Pujiltic

#### 4.7 Resultado RUSLE 2018

Los valores de erosión fueron categorizados en el siguiente orden: baja, media, considerable, alta, muy alta y extrema (Figura 26).

Aplicando el modelo RUSLE para el año 2018 se obtiene una erosión hídrica actual máxima de 13,385 ton/ha/año. Este resultado se debe principalmente al factor LS y el factor R, ya que como se pudo observar, las áreas con pendientes fuertes son las que presenta erosión alta, muy alta y extrema. Por consiguiente, el efecto del factor R se ve presente a partir del mes de mayo que es cuando inicia la temporada de lluvia.

Del total de la superficie del área se tiene que la mayoría se encuentra con erosión baja, con un porcentaje de 94.08 % (Cuadro 18).

La suma de la erosión alta, muy alta y extrema fue de 354.46 ha y este resultado es muy preocupante por lo que es necesario aplicar prácticas de retención de suelo. Las áreas con pendientes fuertes son las que presenta el problema de erosión, por lo que podemos decir que el cultivo de caña en áreas con pendientes fuertes no es recomendable su establecimiento (Figura 26).

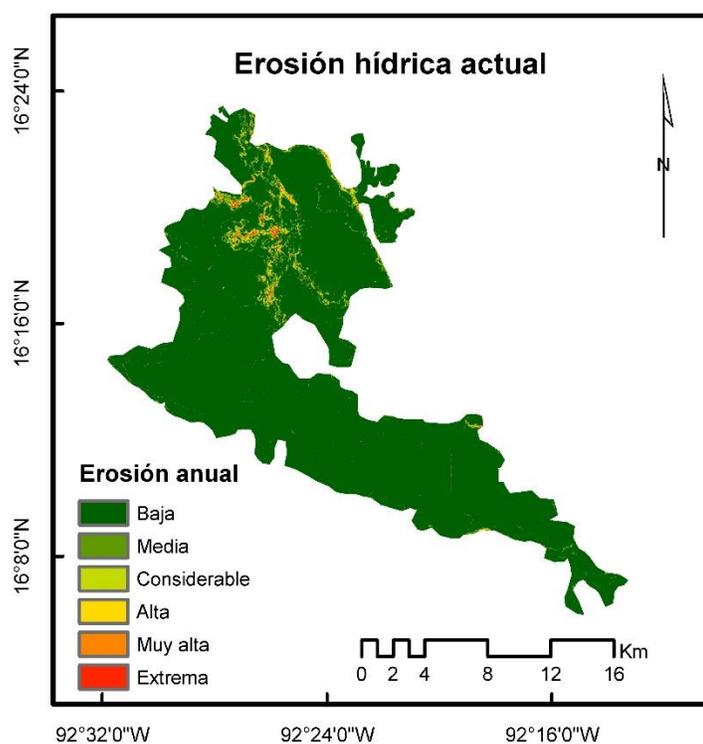
De acuerdo a Aguilar (2015), donde aplicó el mismo modelo, reportó una erosión hídrica actual de 131.9 ton/ha/año la cual es muy baja en comparación con el presente estudio. La diferencia entre el estudio presente se debe principalmente por el establecimiento de parcelas experimentales, de las cuales obtuvo el factor K de una manera más exacta.

Por otra parte Ortiz (2014) reportó una erosión hídrica actual de 3.50 ton/ha/año lo que representa una gran diferencia con el presente estudio. La diferencia de resultados se le puede atribuir al factor LS, ya que el área de estudio de Ortiz (2014) presenta pocas pendientes pronunciadas, lo que Aguilar (2015) presenta pendientes de hasta 70 %.

Ganasri & Ramesh (2016) realizó un estudio muy parecido al estudio que nos ocupa, utilizando imágenes satelitales y reporto una erosión hídrica actual de 488,012.6 ton/ha/año en la cuenca Nethravathi. Esta diferencia de resultados se debe principalmente al factor L y la superficie de la cuenca.

**Cuadro 18** Tasa de erosión hídrica mediante método RUSLE del año 2018 de la subcuenca Pujilic

Categoría	Superficie (ha)	Porcentaje (%)	Clasificación
1	28798.9266	94.0887365	Baja
2	1062.65692	3.471798	Media
3	392.215249	1.281403	Considerable
4	170.886279	0.558301	Alta
5	79.9939755	0.261348	Muy alta
6	103.582555	0.338414	Extrema
<b>Total general</b>	<b>30608.2616</b>	<b>100</b>	



**Figura 26** Tasa de erosión hídrica mediante método RUSLE del año 2018 de la subcuenca Pujilic

## V CONCLUSIONES

Aplicando sistemas de información geográfica (SIG) y utilizando la Ecuación Universal de pérdida de suelo revisada (RUSLE) fue posible determinar la erosión hídrica actual correspondiente al año 2018.

La mayor superficie de la subcuenca presenta una erosión hídrica baja, por lo que el cultivo de caña de azúcar no influye de manera importante en el aumento de la tasa de erosión hídrica.

Los factores longitud y ángulo de inclinación de la pendiente "LS" influye en tasa de erosión hídrica en las superficies con pendientes altas, mientras que en pendientes bajas no influye de manera significativa; la erosividad de la lluvia "R", influye en la tasa de erosión hídrica de manera significativa a medida que aumentan las precipitaciones.

## **VI RECOMENDACIONES**

El uso de las imágenes Sentinel es necesario para este tipo de estudios, por lo que se recomienda su utilización. Por último, se recomienda el uso de Índice de Vegetación Normalizada NDVI en cultivos con hojas perennes, ya que es un buen indicador de la cubierta vegetal. En tal caso de que no se cuente con imágenes libres de nubosidad es recomendable el uso de drones. Si se desea un resultado más exacto es necesario realizar estudios experimentales.

## VII LITERATURA CITADA

- A. Gavande, S., 1979. Física de suelos. 1 ed. México: REBOSAN.
- Aguilar, O. R., 2015. Obras de Conservacion de Suelos en Carcavas, para Contrarestar la Erosion en los Predios Fraccion La Pochota y El Zapote, Villa Corzo, Chiapas. Universidad Autonoma Antonio Narro, 1(1), pp. 41-56.
- Allen R.G. 2006. Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos por organización de las naciones unidas para la agricultura y la alimentación FAO estudio riego y drenaje 56, Roma, 323p.
- Almorox Alanso, J., López Bermúdez, F. & Rafaelli, S., 2010. La degradación de los suelos por erosión hídrica. edit.um, 1(1), pp. 335-336.
- Astier Calderón, M., Maass Moreno, M. & Etchevers Barra, J., 2002. Derivación de indicadores de calidad de suelos en el contexto de la agricultura sustentable. Agrociencia, 36(5), pp. 605-620.
- Cardoza Vázquez, R. y otros, 2007. Protección, restauración y conservación de suelos forestales, Zapopan, Jalisco, México: CONAFOR.
- Clérico, C. & García, P.. F., 2001. Aplicaciones del modelo usle/rusle para estimar pérdidas de suelo por erosión en uruguay y la región sur de la cuenca del río de la plata.. Agrociencia, pp. 92-103.
- Cuevas Flores, L. y otros, 2004. Protección, restauración y conservación de suelos forestales, Zapopan, Jalisco, México: CONAFOR.
- Doduque, G. & Escobar, C. E., 2002. La erosion del suelo y su relacion con el agua. En: Mecanica de los suelos. colombia: universidad nacional de colombia, pp. 68-79.

- Enriqueta, G., 1998. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. 6ta ed. México: Comisión Nacional para el Estudio de la Biodiversidad.
- Flores López, H. E., de la Mora Orozco, C., Ruíz Corral, J. . A. & Chávez Durán, Á. A., 2013. EFECTO DE LA COBERTURA DE SUELO DE TRES. Revista Chapingo, 1(1), pp. 21-24.
- Ganasri, B. & Ramesh, H., 2016. Assessment of soil erosion by RUSLE model using remote sensing and GIS - A case study of Nethravathi Basin. Geoscience Frontiers, 7(1), pp. 953-961.
- Ibáñez Asensio, S., Moreno Ramón, H. & Gisbert Blanquer, J. M., 2012. LA ECUACIÓN UNIVERSAL DE PERDIDA DE SUELO (USLE). UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA, 1(1), pp. 1-10.
- León Peláez, J. D., 2001. MÉTODOS EXPERIMENTALES PARA EL SEGUIMIENTO Y ESTUDIO DE LA EROSIÓN HÍDRICA. Universidad Nacional de Colombia, 1(1), pp. 6-20.
- Loredo Osti, C., Beltrán López, S., Moreno Sánchez, F. & Casiano Domínguez, M., 2007. Predicción de riesgo a la erosión hídrica a nivel microcuenca, San Luis Potosí: inifap.
- Montes León, M. A. L., Uribe Alcántara, E. M. & García Celis, E., 2011. Mapa Nacional de Erosión Potencial. Tecnología y Ciencias del Agua, 11(1), pp. 5-17.
- Ortiz, O. P., 2014. Determinación de la erosión hídrica potencial y actual a través de los sistemas de información geográfica. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, 1(1), p. 127.
- Röder, J., Villavicencio García, R. & Zarazúa Villaseñor, P., 2006. APLICACIÓN DE LA ECUACIÓN UNIVERSAL DE PÉRDIDA DE SUELO "USLE" EN SIG PARA ESTIMAR RIESGO POTENCIAL DE EROSIÓN EN EL ÁREA

PROTEGIDA "SIERRA DE QUILA". Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias (CUCBA), pp. 161-162.

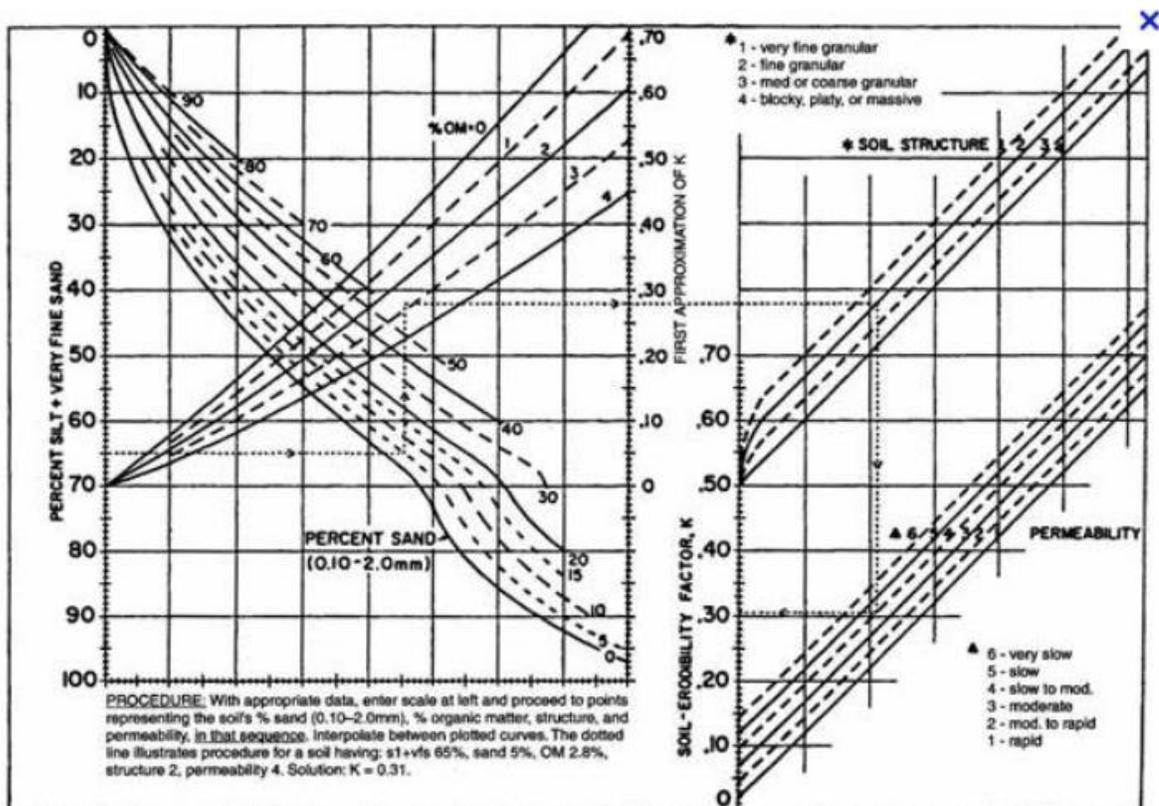
Rzedowski, J., 2006. Vegetación México. 1ra ed. Mexico: Limusa S.A.

SAGARPA, 2015. FICHA TÉCNICA DEL CULTIVO DE LA CAÑA DE AZÚCAR (*Saccharum officinarum* L.), MEXICO: SAGARPA.

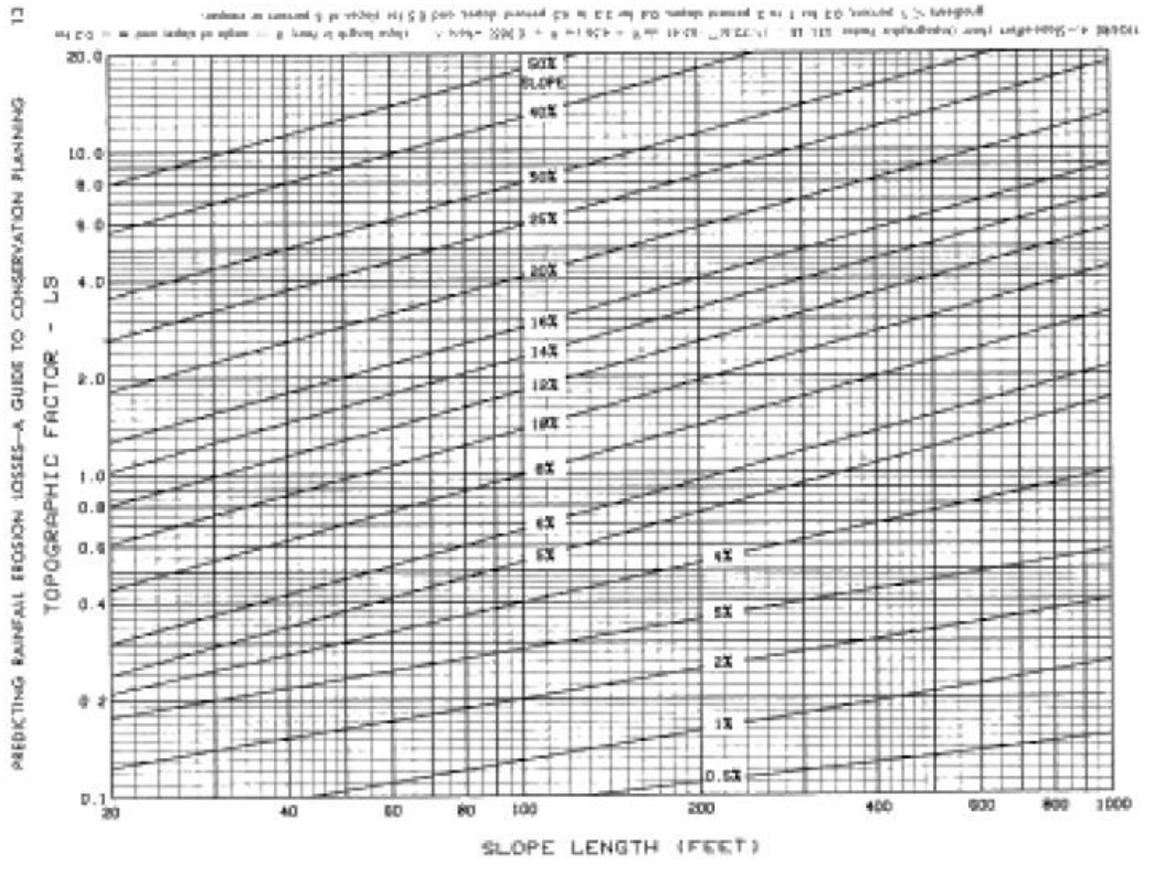
SEMARNAT, 2002. Evaluación de la Degradación del Suelo causada por el Hombre en la República Mexicana, MEXICO: SEMARNAT.

Zabala, J. y otros, 2011. Degradación y conservación de suelos en la cuenca del Río Grijalva, Tabasco. Villa Hermosa, Tabasco: Secretaría de Recursos Naturales y Protección Ambiental.

## VIII APÉNDICE O ANEXOS



Anexo 1 Nomograma para el factor K desarrollado por Wischmeier y Smith



**Anexo 2** Nomograma para el factor longitud y ángulo de la pendiente “L” desarrollado por Wischmeier y Smith