



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE AGUASCALIENTES

CENTRO DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

**MAESTRÍA EN CIENCIAS CON OPCIONES A AGRONÓMICAS
O VETERINARIAS**

TESIS

**CALIBRACIÓN DEL FACTOR K/USLE EN UNA UNIDAD DE SUELO Y DOS
CONDICIONES DE USO EN AGUASCALIENTES, MÉXICO**

PRESENTA

Ing. Fernando Rufino Rodríguez

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN
CIENCIAS AGRONÓMICAS**

TUTOR

Dr. Antonio de Jesús Meraz Jiménez

CO-TUTOR

Dr. Armando López Santos

INTEGRANTES DEL COMITÉ TUTORAL

Dr. Joaquín Sosa Ramírez

M.C. Amalio Ponce Montoya

Aguascalientes, Ags, mayo de 2019



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE AGUASCALIENTES
CENTRO DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

DR. RAÚL ORTIZ MARTÍNEZ

DECANO DEL CENTRO DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

PRESENTE

Por medio del presente como TUTOR-Integrante del comité tutorial designado del estudiante **FERNANDO RUFINO RODRÍGUEZ** con ID 129956 quien realizó la tesis titulada: **CALIBRACIÓN DEL FACTOR K/USLE EN UNA UNIDAD DE SUELO Y DOS CONDICIONES DE USO EN AGUASCALIENTES, MÉXICO**, y con fundamento en el artículo 175, Apartado II del Reglamento General de Docencia, me permito emitir el **VOTO APROBATORIO**, para que él pueda proceder a imprimirla, y así como continuar con el procedimiento administrativo para la obtención del grado.

Pongo lo anterior a su digna consideración y sin otro particular por el momento, me permito enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE

"SE LUMEN PROFERRE"

Aguascalientes, Ags., a 12 de abril de 2019

DR. ANTONIO DE JESÚS MERAZ JIMÉNEZ

TUTOR



c.c.p – Interesado

c.c.p. – Secretaría Técnica del programa de Posgrado



"ENSEÑAR LA EXPLOTACION DE LA TIERRA, NO LA DEL HOMBRE"

UNIVERSIDAD AUTONOMA CHAPINGO

UNIDAD REGIONAL UNIVERISTARIA DE ZONAS ARIDAS

TELS.(01-872)776-01-60, 776-01-90 fax: 776-00-43
BERMEJILLO, DGO.

DEPENDENCIA: **Posgrado**

NUMERO DE OFICIO: 602.25/

EXPEDIENTE: **Asesoría & Comité Tutorial**

ASUNTO: Voto aprobatorio

Abril 15, 2019

Dr. Raúl Ortiz Martínez
Decano del Centro de Ciencias Agropecuarias
Universidad Autónoma de Aguascalientes
Presente.-

Estimado Dr. Ortiz:

Por medio del presente, me dirijo a Usted en mi carácter de CO-TUTOR-Integrante del comité tutorial designado del estudiante de Posgrado c. *Ing. Fernando Rufino Rodriguez* con ID 129956, quien realizó la tesis titulada: Calibración del factor K/USLE en una unidad de suelo y dos condiciones de uso en Aguascalientes, México, y con fundamento en el artículo 175, Apartado II del Reglamento General de Docencia, me permito emitir el **VOTO APROBATORIO**, para que él pueda proceder a imprimirla, y así como continuar con el procedimiento administrativo para la obtención del grado.

Pongo lo anterior a su digna consideración y sin otro particular por el momento, me permito enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE

Dr. Armando López Santos
Profesor-Investigador
CO-TUTOR

AL CONTESTAR ESTE OFICIO CITENSE
LOS DATOS CONTENIDOS EN EL CUADRO
DEL ANGULO SUPERIOR DERECHO

C.c.p Al. c. *Ing. Fernando Rufino Rodríguez.- Interesado/CCA-UAA*

Archivo



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE AGUASCALIENTES
CENTRO DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

DR. RAÚL ORTIZ MARTÍNEZ
DECANO DEL CENTRO DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

PRESENTE

Por medio del presente como ASESOR-Integrante del comité tutorial designado del estudiante **FERNANDO RUFINO RODRÍGUEZ** con ID 129956 quien realizó la tesis titulada: **CALIBRACIÓN DEL FACTOR K/USLE EN UNA UNIDAD DE SUELO Y DOS CONDICIONES DE USO EN AGUASCALIENTES, MÉXICO**, y con fundamento en el artículo 175, Apartado II del Reglamento General de Docencia, me permito emitir el **VOTO APROBATORIO**, para que él pueda proceder a imprimirla, y así como continuar con el procedimiento administrativo para la obtención del grado.

Pongo lo anterior a su digna consideración y sin otro particular por el momento, me permito enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE

"SE LUMEN PROFERRE"

Aguascalientes, Ags., a 12 de abril de 2019

DR. JOAQUÍN SOSA RAMÍREZ

ASESOR DE TESIS



c.c.p – Interesado

c.c.p. – Secretaría Técnica del programa de Posgrado



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE AGUASCALIENTES
CENTRO DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

DR. RAÚL ORTIZ MARTÍNEZ
DECANO DEL CENTRO DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

PRESENTE

Por medio del presente como ASESOR-Integrante del comité tutorial designado del estudiante **FERNANDO RUFINO RODRÍGUEZ** con ID 129956 quien realizó la tesis titulada: **CALIBRACIÓN DEL FACTOR K/USLE EN UNA UNIDAD DE SUELO Y DOS CONDICIONES DE USO EN AGUASCALIENTES, MÉXICO**, y con fundamento en el artículo 175, Apartado II del Reglamento General de Docencia, me permito emitir el **VOTO APROBATORIO**, para que él pueda proceder a imprimirla, y así como continuar con el procedimiento administrativo para la obtención del grado.

Pongo lo anterior a su digna consideración y sin otro particular por el momento, me permito enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE

"SE LUMEN PROFERRE"

Aguascalientes, Ags., a 12 de abril de 2019


MC. AMALIO PONCE MONTOYA
ASESOR DE TESIS



c.c.p – Interesado

c.c.p. – Secretaria Técnica del programa de Posgrado



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE AGUASCALIENTES
CENTRO DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

OF. NO. CCA-D-11-15-051-19

DRA. EN ADMÓN. MARÍA DEL CARMEN MARTÍNEZ SERNA
DIRECTORA GENERAL DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO
P R E S E N T E.

Por medio de la presente me permito comunicarle a usted que la tesis titulada "CALIBRACIÓN DEL FACTOR K/USLE EN UNA UNIDAD DE SUELO Y DOS CONDICIONES DE USO EN AGUASCALIENTES, MÉXICO", del alumno **FERNANDO RUFINO RODRÍGUEZ**, egresado de la Maestría en Ciencias Agronómicas y Veterinarias, respeta las normas y lineamientos establecidos institucionalmente para su elaboración y su autor cuenta con el voto aprobatorio de su tutor y comité tutorial.

Sin más por el momento aprovecho la ocasión para enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE
Jesús María, Ags., 15 de abril del 2019
"SE LUMEN PROFERRE"

Dr. Raúl Ortiz Martínez
Decano del Centro



c.c.p. Jefa del Departamento de Control Escolar
c.c.p. Sección de Certificados y Títulos
c.c.p. Secretario Técnico
c.c.p. Estudiante
c.c.p. Archivo

AGRADECIMIENTOS

A la **Universidad Autónoma de Aguascalientes** por haberme brindado la oportunidad de realizar mis estudios de posgrado y proporcionado los materiales e instalaciones necesarias para el desarrollo de mis actividades de investigación.

A el **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT)** por otorgarme la beca con el número 815683 para que pudiera realizar mis estudios de posgrado.

Al **Dr. Antonio de Jesús Meraz Jiménez** por todo su apoyo y disponibilidad para ayudarme en la realización de mi proyecto de investigación, y en mi formación profesional a lo largo del posgrado, así como en la confianza que me tuvo para tomar la responsabilidad de ser mi tutor.

Al **Dr. Armando López Santos** por toda la ayuda que me brindó a lo largo del posgrado para desarrollar mis habilidades en la investigación, así como distintas habilidades y capacidades que me serán de mucha utilidad en mi vida profesional, así como permitirme participar en el proyecto de investigación que él lidera. Además de su tiempo y disponibilidad que me brindo durante mi estancia en la URUZA-Chapingo.

Al **M. en C. Amalio Ponce Montoya** por su apoyo en la parte técnica de mi proyecto de investigación y por los cuestionamientos que me hizo, los cuales me ayudaron a desarrollar y reflexionar de una mejor forma mi proyecto de investigación, y la búsqueda del porqué de las cosas, que estoy seguro fueron fundamentales para mi desarrollo profesional y la obtención de buenos resultados.

Al **Dr. Joaquín Sosa Ramírez** por su ayuda en la parte teórica de mi proyecto de investigación, por apoyarme con bibliografía y en el desarrollo de mis objetivos e hipótesis.

Al **M. en C. Jorge Alejandro Torres González** por todo su apoyo durante el posgrado, tanto en campo con el establecimiento de mis unidades experimentales, muestreos, etc. como en mi desarrollo profesional, en el desarrollo de mi tesis, por sus consejos y por su amistad.

A la **M. en C. Araceli Guadalupe Mendieta Vázquez** por su apoyo en laboratorio y campo para desarrollar las actividades referentes a mi proyecto de investigación, así como en su apoyo en la revisión de la redacción de mi trabajo de investigación y por su amistad.

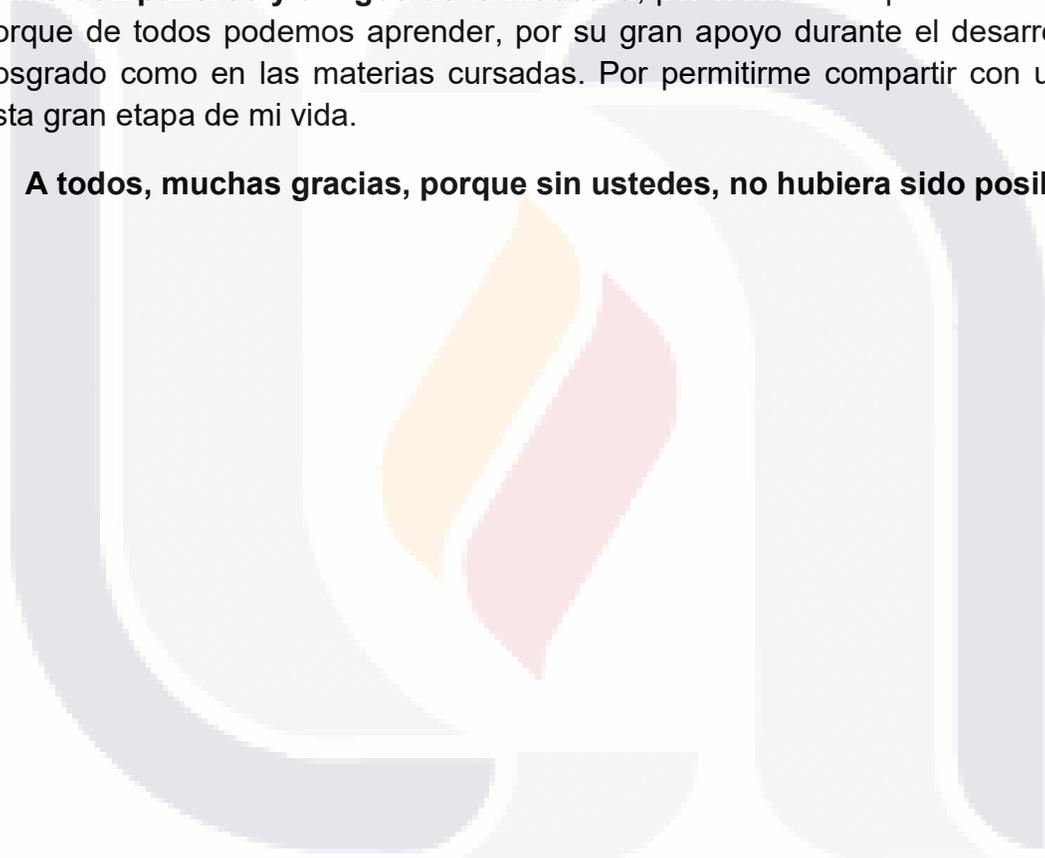
Al **Ing. Alberto Rangel Muñoz** por su apoyo en campo en el mantenimiento de las unidades experimentales, en los muestreos, así como en su disponibilidad para ayudarme.

Al **Ing. José Álvarez Reyes** por su ayuda en el desarrollo de mi proyecto de investigación, así como en su asesoría a lo largo del posgrado.

A la **M. en C. Liliana Barba de Alba** por su disponibilidad a enseñarme la metodología para realizar los análisis de laboratorio de las muestras de suelo.

A **mis compañeros y amigos de la maestría**, por todas las experiencias vividas, porque de todos podemos aprender, por su gran apoyo durante el desarrollo del posgrado como en las materias cursadas. Por permitirme compartir con ustedes esta gran etapa de mi vida.

A todos, muchas gracias, porque sin ustedes, no hubiera sido posible.



DEDICATORIAS

A mi madre **Ma. Del Carmen Rodríguez Gallardo**, por su amor, dedicación, entrega, paciencia y apoyo a lo largo de toda mi vida.

Y muy especialmente a **DIOS** que me ha dado la oportunidad de realizar este estudio, por todo lo que me ha dado: la familia, los amigos, las oportunidades y todas las satisfacciones que he tenido a lo largo de mi vida.



ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL.....	1
ÍNDICE DE CUADROS	4
ÍNDICE DE FIGURAS	5
RESUMEN	8
ABSTRACT	9
INTRODUCCIÓN	10
I. MARCO TEÓRICO	12
1.1 El suelo	12
1.1.1 Degradación de las tierras.....	13
1.1.2 Índices de erosión en el mundo.....	13
1.1.3 La erosión en México.....	15
1.1.4 La erosión en Aguascalientes.....	17
1.2 La ecuación universal de pérdida del suelo	18
1.2.1 Índice de erosividad de la lluvia (R).....	19
1.2.2 Factor de la erosionabilidad del suelo (k)	19
1.2.3 Definición del factor K.....	20
1.2.4 Factor topográfico (LS).....	21
1.2.5 Factor de cobertura y manejo (C).....	22
1.3 Estructura (S).....	22
1.4 Materia orgánica en el suelo (MOS)	23
II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	24
III. JUSTIFICACIÓN.....	24
IV. OBJETIVOS	25

4.1. Objetivo general 25

4.2. Objetivos específicos..... 25

V. HIPÓTESIS 25

5.1. Hipótesis general 25

5.2. Hipótesis particulares 25

VI. MATERIALES Y MÉTODOS..... 26

6.1. Ubicación del área de estudio..... 26

6.1.1 Caracterización edáfica 28

6.1.2 Descripción resumida de los Phaeozems..... 28

6.1.3 Descripción del uso de suelo y vegetación en el estado de Aguascalientes 29

6.1.4 Descripción de las tasas de erosión en el estado de Aguascalientes.... 30

6.2. Determinación de estructura S..... 31

6.3 Determinación de textura y MOS 32

6.4 Densidad aparente y porosidad del suelo..... 33

6.5 Permeabilidad (P) 33

6.5.1 Modelo Kostiakov-Lewis para el análisis de los datos de permeabilidad33

6.5.2 Determinación de la permeabilidad 34

6.6 Diseño experimental 36

6.7 Tratamientos 36

6.7.1 Descripción de los tratamientos..... 37

6.8. Parcelas de escurrimiento 39

6.9 Toma de muestras de suelo 40

6.10 Toma de muestras y cuantificación de sedimentos 41

6.11 Técnicas de análisis..... 43

6.11.1 Cálculo del factor R	43
6.11.2 Cálculo del factor K por el método de las ecuaciones de regresión	45
6.11.3 Cálculo del factor K por el método de las parcelas de escurrimiento.....	46
6.11.4 Cálculo del factor K por el método de referencia FK_T	47
VII. Resultados.....	49
7.1 Caracterización edáfica	49
7.1.1 Color del suelo.....	51
7.1.2 Determinación de la Permeabilidad (P)	52
7.1.3 Determinación del factor K	56
7.2 Pérdida de suelo medido en las parcelas de escurrimiento.....	60
7.3 Determinación del factor de erosividad de la lluvia R	62
7.3.1 Determinación del índice de erosividad de la lluvia	62
7.3.2 Índice de erosividad de la lluvia por evento (EI30) y el arrastre de sedimentos en la Unidad Experimental 1 para el año 2017.....	63
7.3.3 Índice de erosividad de la lluvia por evento (EI30) y el arrastre de sedimentos en la Unidad Experimental 2 para el año 2017.....	66
7.3.4 Índice de erosividad de la lluvia por evento (EI30) y el arrastre de sedimentos en la Unidad Experimental 1 para el año 2018.....	69
7.3.5 Índice de erosividad de la lluvia por evento (EI30) y el arrastre de sedimentos en la Unidad Experimental 2, para el año 2018.....	71
7.4 Estimación de la precipitación en cada unidad experimental.....	74
7.5 Relación entre la pérdida de sedimentos y las características de la lluvia... 76	
VIII. Discusión de resultados.....	79
IX. Conclusiones	81
Bibliografía	82

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Extensión de la degradación inducida por el hombre (millones de ha).	14
Cuadro 2. Rangos de clasificación de la erosión hídrica.	16
Cuadro 3. Códigos de estructura del suelo de USLE.	31
Cuadro 4. Clasificación de la materia orgánica con base en su porcentaje.	33
Cuadro 5. Velocidades y clases de Permeabilidad.....	35
Cuadro 6. Descripción del acomodo en campo de las parcelas de escurrimiento.	36
Cuadro 7. Factores de erosionabilidad del suelo asociados a la textura y contenido de MOS.	47
Cuadro 8. Caracterización inicial para determinar erosionabilidad por sitio muestreado para el año 2017.....	50
Cuadro 9. Caracterización inicial para determinar erosionabilidad por sitio muestreado para el año 2018.....	51
Cuadro 10. Tasas de infiltración inicial y final para Ft y Fe, medidos en campo y estimados con base en 8 modelos K-L con diferentes valores de R2.	56
Cuadro 11. Parámetros empleados para calcular el factor K en las unidades experimentales 1 (AP) y 2 (AA) para el año 2017.	58
Cuadro 12. Parámetros empleados para calcular el factor K en las unidades experimentales 1 (AP) y 2 (AA) para el año 2018.	59
Cuadro 13. Correlación entre tratamientos de la Unidad experimental 1 (AP) para el año 2017.....	76
Cuadro 14. Correlación entre tratamientos de la Unidad experimental 2 (AA) para el año 2017.....	77
Cuadro 15. Correlación entre tratamientos de la Unidad experimental 1 (AP) para el año 2018.....	78
Cuadro 16. Correlación entre tratamientos de la Unidad experimental 2 (AA) para el año 2018.....	78

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Degradación de la tierra por influencia antrópica a nivel global.	14
Figura 2. Estado actual de la erosión en México.....	15
Figura 3. Mapa nacional de erosión potencial.....	16
Figura 4. Porcentajes de erosión que presenta el estado de Aguascalientes.....	18
Figura 6. Ubicación de las Unidades Experimentales 1AP y 2 AA.....	26
Figura 7. Unidad Experimental 1 Área Pecuaria	27
Figura 8. Unidad Experimental 2 Área Agrícola	28
Figura 9. Unidades de suelo presentes en el municipio de Jesús María, Aguascalientes.....	29
Figura 10. Uso del suelo y vegetación del estado de Aguascalientes.....	30
Figura 11. Grado de erosión del suelo en el estado de Aguascalientes.	31
Figura 12. Toma de datos de infiltración con mini-infiltrómetro de doble anillo.....	35
Figura 13. Tratamientos: Suelo desnudo (a); Barbecho (b); Barbecho con esquilmo (c); y Pastizal Inducido (d).....	39
Figura 14. Diseño de las parcelas de escurrimiento	40
Figura 15. Toma de muestras de suelo en las parcelas experimentales	41
Figura 16. Procedimiento para la toma de muestras de sedimentos	43
Figura 17. Muestras de suelo evaluadas en seco y húmedo de la UE 1 y 2 (a y c) y hojas de la tabla de colores Munsell en seco b) y húmedo d).....	52
Figura 18. Comportamiento gráfico promedio del movimiento del agua a través del perfil del suelo en 30 minutos para el T1, T2, T3 y T4 de la UE 1 (AP).	54
Figura 19. Comportamiento gráfico promedio del movimiento del agua a través del perfil del suelo en 30 minutos para el T1, T2, T3 y T4 de la UE 2 (AA).	55
Figura 20. Cantidad de suelo perdido en cada tratamiento de las Unidades Experimentales 1 (AP) y 2 (AA) en el año 2017.....	61
Figura 21. Cantidad de suelo perdido en cada tratamiento de las Unidades Experimentales 1 (AP) y 2 (AA) en el año 2018.....	62

Figura 22. Índice de erosividad por evento de lluvia y generación de sedimentos.
 Unidad experimental 1. T1: Suelo desnudo. 64

Figura 23. Índice de erosividad por evento de lluvia y generación de sedimentos.
 Unidad experimental 1. T2: Barbecho..... 65

Figura 24. Índice de erosividad por evento de lluvia y generación de sedimentos.
 Unidad experimental 1. T4: Pastizal inducido. 65

Figura 25. Índice de erosividad por evento de lluvia y generación de sedimentos.
 Unidad experimental 1. T3: Barbecho con esquilmo..... 66

Figura 26. Índice de erosividad por evento de lluvia y generación de sedimentos.
 Unidad experimental 2. T1: Suelo desnudo. 67

Figura 27. Índice de erosividad por evento de lluvia y generación de sedimentos.
 Unidad experimental 2. T2: Barbecho..... 67

Figura 28. Índice de erosividad por evento de lluvia y generación de sedimentos.
 Unidad experimental 2. T4: Pastizal inducido. 68

Figura 29. Índice de erosividad por evento de lluvia y generación de sedimentos.
 Unidad experimental 2. T3: Barbecho con esquilmo..... 68

Figura 30. Índice de erosividad por evento de lluvia y generación de sedimentos.
 Unidad experimental 1. T1: Suelo desnudo. 69

Figura 31. Índice de erosividad por evento de lluvia y generación de sedimentos.
 Unidad experimental 1. T2: Barbecho..... 70

Figura 32. Índice de erosividad por evento de lluvia y generación de sedimentos.
 Unidad experimental 1. T4: Pastizal Inducido. 71

Figura 33. Índice de erosividad por evento de lluvia y generación de sedimentos.
 Unidad experimental 1. T3: Barbecho con esquilmo..... 71

Figura 34. Índice de erosividad por evento de lluvia y generación de sedimentos.
 Unidad experimental 2. T1: Suelo desnudo. 72

Figura 35. Índice de erosividad por evento de lluvia y generación de sedimentos.
 Unidad experimental 2. T2: Barbecho..... 73

Figura 36. Índice de erosividad por evento de lluvia y generación de sedimentos.
 Unidad experimental 2. T3: Barbecho con esquilmo..... 73

Figura 37. Índice de erosividad por evento de lluvia y generación de sedimentos.
Unidad experimental 2. T4: Pastizal Inducido. 74

Figura 38. Rangos de precipitación por medio de interpolación con IDW (a) e
interpolación con Kriging (b) en el municipio de Jesús María y su influencia en los
sitios experimentales con datos de las estaciones meteorológicas INIFAP para el
año 2017. 75



RESUMEN

Las metodologías utilizadas para determinar la erosión en los suelos negros de México como lo es la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (EUPS), presenta discrepancias por la generalización de los valores intrínsecos del suelo, que provocan errores en los límites permisibles, siendo el factor de erosionabilidad o factor K (FK) el más susceptible. El objetivo del presente estudio fue calcular el factor K de la USLE con el método de referencia de la FAO y dos ecuaciones de regresión, para asociar sus resultados con las tasas de sedimentación en las parcelas de escurrimiento con distintos tratamientos en dos unidades experimentales. Se realizaron muestreos *in situ* en cada una de las parcelas de escurrimiento, para las que se definieron cuatro tratamientos: T1, Suelo desnudo (SD); T2, Barbecho (B); T3, Barbecho con esquilmo (BE); y T4, Pastizal inducido (PI). Se determinaron el contenido de materia orgánica, clase textural, tipo de estructura y permeabilidad. Los resultados muestran diferencias entre FK estimado por Wischmeier y Smith (FK_{ws}) y el FK propuesto por Yang (FK_Y); promediando el FK de los dos años evaluados (2017 y 2018) las diferencias fueron de: 0.0163, 0.016, 0.0145 y 0.0148 para T1, T2, T3 y T4 de la unidad experimental 1 (UE 1), mientras para la (UE 2) las diferencias fueron de: 0.0123, 0.0125, 0.0136 y 0.0127 $t h MJ mm$ para T1, T2, T3 y T4 respectivamente. Dichas diferencias significan una subestimación 0.26 veces en magnitud para FK_{ws} respecto FK_Y en ambas UE. Además de ello, del análisis estadístico se rechaza la hipótesis nula (H_0) para los promedios de cada tratamiento ($T1=T2=T3=T4$). Pudiendo usar estos datos para establecer rangos máximos y mínimos en las estimaciones de FK , con lo que se obtendrían mejores resultados que con valores estandarizados que subestiman las tasas de erosión.

Palabras clave: Factor K/USLE, erosionabilidad, determinación

ABSTRACT

The methodologies to determine the erosion in the black soils of Mexico as the Universal Equation of Soil Loss (EUPS), present discrepancies in the generalization of the intrinsic values of the soil, which cause errors in the permissible limits, being the factor of erosion or K factor (FK) the most susceptible. The objective of the present study was to calculate the K factor of the USLE with the FAO reference method and the regression equations, to associate their results with the sedimentation rates in the runoff plots with the different treatments in two experimental units. In situ sampling was carried out in each of the runoff plots, for which four treatments were defined: T1, Bare soil (SD); T2, Fallow (B); T3, fallow with esquilmo (BE); and T4, induced pasture (PI). The content of organic matter, texture class, structure type and permeability were determined. The results show differences between FK estimated by Wischmeier and Smith (FKWS) and the FK proposed by Yang (FKY); Averaging the FK of the two years evaluated (2017 and 2018) the differences were: 0.0163, 0.016, 0.0145 and 0.0148 for T1, T2, T3 and T4 of the experimental unit 1 (EU 1), while for the (EU 2) The differences were: 0.0123, 0.0125, 0.0136 and 0.0127 th MJ mm for T1, T2, T3 and T4 respectively. These differences mean an underestimation 0.26 times in magnitude for FKWS with respect to FKY in both UEs. In addition, in the statistical analysis, the null hypothesis (H0) is rejected for the averages of each treatment ($T1 = T2 = T3 = T4$). Being able to use this data to establish the maximum and minimum ranges in the results of the FK, in order to obtain better results than the standardized values that underestimate the erosion rates.

Keywords: K / USLE factor, erodibility, determination.

INTRODUCCIÓN

La erosión del suelo provocada por la lluvia es un fenómeno natural exacerbado principalmente por las actividades humanas sobre los ecosistemas terrestres como son la agricultura, ganadería extensiva y la deforestación, entre otros. Lo que está provocando que se convierta en un problema por las altas tasas de pérdida de suelo que se están generando en diversas regiones con los cambios de uso de suelo.

Actualmente la erosión edáfica producida por la acción del agua se considera la principal causa de la degradación del suelo en el mundo, pues debido a este fenómeno 3.5 mil millones de hectáreas a nivel mundial tienen algún grado de deterioro, siendo en estos lugares donde habitan alrededor de 1,500 millones de personas (Nkonya y col., 2011; UNCCD, 2013; Stavi y Lal, 2014).

El proceso erosivo se relaciona estrechamente con la desertificación y el cambio climático, fenómenos que contribuyen a la pérdida de la biodiversidad, acentúan los índices de pobreza y ocasiona mayor migración, disminuyendo la productividad del suelo y produciendo mayor incidencia de eventos climáticos extremos. (González y col., 2016). La variación climática ha empeorado recientemente, viéndose afectados muchos países, incluyendo a México (SEMARNAT-INECC, 2012).

La susceptibilidad de México a la erosión provocada por el agua es alta debido a que aproximadamente 42.2% del territorio nacional presenta una pendiente superior al tres por ciento. Esta característica topográfica, aunado al mal manejo de los bosques, áreas agrícolas y los agostaderos para el pastoreo, facilita la generación de escurrimientos, que erosionan la superficie del suelo (Garrido A, Cotler H, 2010; Lal R, 2001; Cotler AH, 2003).

En México existen diversas estimaciones de la tasa promedio de erosión basadas en distintos reportes (Garrido y Cotler, 2010; SEMARNAT, 2011; CONAFOR-UACH, 2013) citados por López, (2016) el cual menciona grandes variaciones en los resultados de estos estudios que reportan afectaciones por erosión hídrica en una

superficie de entre el 11 y el 35% del territorio nacional, atribuyéndole estos resultados a las escasas bases de datos de los suelos en el territorio nacional y a la necesidad de realizar más estudios de este tipo.

Se ha documentado en varios estudios enfocados en el análisis y la evaluación de riesgo, monitoreo y mapeo a diferentes escalas para la modelación y construcción de escenarios de erosión (Sánchez y col. 2013) Estos trabajos se han desarrollado empleando diversos modelos, como lo son USLE, WEPP, EPIC, RUSLE, SWAT, entre otros. La Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE) o alguna de sus modificaciones RUSLE/MUSLE que se usa para estimar la erosionabilidad del suelo es la herramienta más utilizada para determinar la erosión hídrica (Verbist et al. 2010; Vich et al. 2010; Mazllom, Emami, y Haghnia, 2016).

I. MARCO TEÓRICO

1.1 El suelo

Los suelos son definidos como materiales naturales no consolidados sobre la superficie terrestre y se componen de sólido, líquido y gas. Contiene materia orgánica e inorgánica íntimamente mezcladas por procesos naturales. Debido a esta mezcla y transformación, se adhiere a un cuerpo poroso. Los poros acomodan aire y agua. Por tal motivo, existen cuatro componentes principales del suelo: materia mineral, materia orgánica, agua y aire.

La evolución del suelo se ha llevado a cabo a través de procesos pedogénicos como un cuerpo dinámico y tridimensional. Los suelos han sustentado el establecimiento de varios ecosistemas en la tierra. Proporcionan anclaje a las plantas además de los nutrientes, agua, aire y calor, protegiéndolas de las toxinas. Los suelos brindan cruciales funciones ecológicas como el de transformar la energía, reciclar materiales, purificar el agua, y sobre todo funcionar como un componente del ecosistema (Osman, 2013).

El suelo es una formación presente entre la intersección de la litósfera, hidrósfera, biósfera y atmósfera. Resultante de un proceso conocido como meteorización en el que intervienen procesos físicos, químicos y biológicos que actúan sobre el medio original (la roca madre). Estos procesos transforman el material parental hasta producir en él las propiedades características de cada suelo.

En Edafología el suelo es considerado un ente natural, organizado con propiedades y un origen, siendo éste el resultado de una serie de factores activos como lo son el clima y los seres vivos que actúan sobre los factores pasivos como la roca madre y el relieve independientemente del tiempo en el que transcurren estos procesos (Gardi y col, 2014).

1.1.1 Degradación de las tierras

La degradación es la disminución o pérdida, principalmente en zonas áridas, semiáridas y subhúmedas secas, de la productividad económica como riqueza biológica de las tierras cultivables, provocados por las actividades humanas y patrones habituales, tales como: la erosión del suelo provocada por la acción del viento o el agua; por el deterioro de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo; además de una pérdida a largo plazo de la vegetación natural; la degradación de las tierras significa por lo tanto, una reducción constante de la productividad de la tierra (Lal, Safriel, y Boer, 2012).

Un estudio en donde se realizó un muestreo amplio del territorio nacional permitió determinar los principales procesos de degradación del suelo que consisten en la erosión hídrica y eólica y la degradación física y química de los suelos; además, permitió identificar las causas que los generan, tipos específicos y rangos de daño en el ecosistema (SEMARNAT, 2012). Según (Zertuche, Badii, Guillen, y Zepeda, 2015) existe otro tipo de erosión reconocido por INEGI que consiste en la erosión antropocéntrica que es causada por las actividades humanas cuando se modifica el entorno natural.

1.1.2 Índices de erosión en el mundo

Como se puede ver en el cuadro 1 y la figura 1, la erosión del suelo a nivel mundial es considerada un serio problema, se estiman pérdidas de suelo que van desde 25 hasta 40,000 millones de toneladas de tierras cultivables cada año (FAO, 2015). La degradación de las tierras se encuentra en constante aumento, abarcando en la actualidad el 23% de la superficie continental y aumenta a una tasa de 5 millones de hectáreas al año, causando afectaciones a alrededor de 1,500 millones de personas en el mundo (Stavi y Lal, 2015).

Cuadro 1. Extensión de la degradación inducida por el hombre (millones de ha).

Tipo de degradación	Mundial	Asia	Asia occidental	África	América Latina	América del norte	Australia pacífico	Europa	% del total
Erosión hídrica	1094	440	84	227	169	60	83	115	55.7
Erosión eólica	548	222	145	187	47	35	16	42	27.9
Degradación química	233	70	53	60	76	---	1	26	11.8
Agotamiento de nutrientes	135	15	6	45	72	---	---	3	6.87
Salinidad	76	53	47	15	4	—	1	4	3.87
Contaminación	22	2	+	+	+	—	—	19	1.12
Degradación física	79	12	4	18	13	1	2	36	4.02
Otra	10	3	1	2	1	—	1	2	0.51
Total	1964	747	287	494	306	96	103	221	
% del total	100	38		25.2	15.6	4.9	5.2	11.3	

+ = incremento de la degradación con valores inferiores a 1; — = disminución de la degradación con valores inferiores a 1. Fuente: (Nkonya y col., 2011).

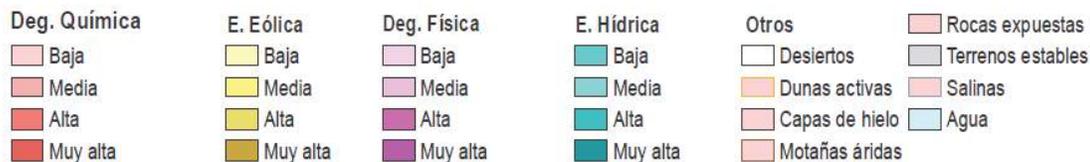
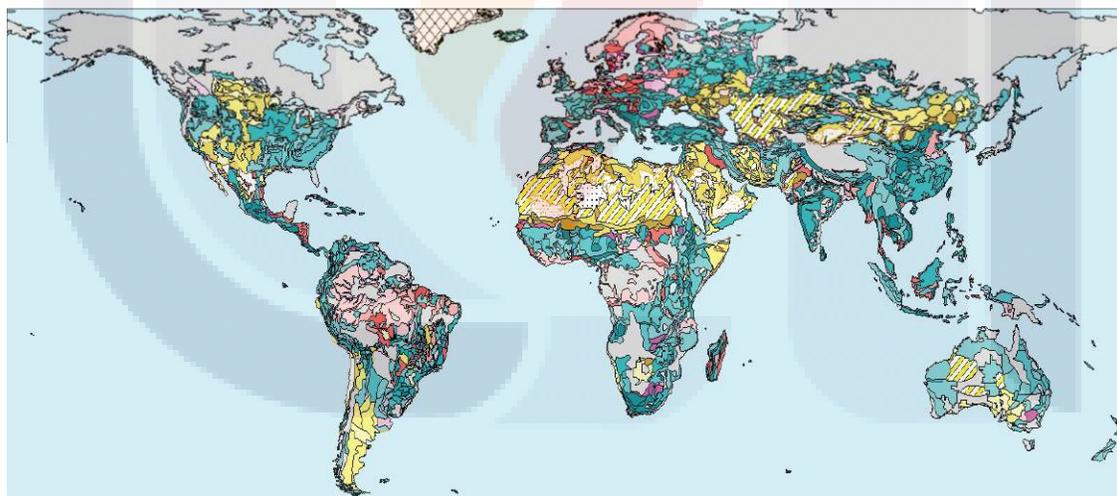


Figura 1. Degradación de la tierra por influencia antrópica a nivel global. Fuente: (ISRIC, 2015) citado por (López, 2016).

1.1.3 La erosión en México

En un ensayo realizado por (López, 2016) en donde promedia los índices de erosión publicados por distintos estudios, indica que el 69.7% aproximadamente 135.4 millones de hectáreas de suelo en México tenían algún tipo de degradación en su componente edáfico, tanto en ecosistemas naturales como en agroecosistemas. Como se muestra en la figura 2, la erosión hídrica es la principal forma de deterioro del suelo con un 25.4% (49.4 millones de ha) seguida de la degradación química y la erosión eólica con el 20.1% (39 millones de ha) cada una, siendo la degradación física la que menos afecta con solo el 4.1% (7.9 millones de ha).



Figura 2. Estado actual de la erosión en México.

Elaboración propia. Fuente: López (2016).

En un estudio realizado por (Montes-León y col, 2016) elaboraron un mapa de la erosión potencial del suelo en México (figura 3) en donde se pueden ver las zonas más afectadas por la erosión usando la USLE como metodología para realizar dicho estudio.



Figura 3. Mapa nacional de erosión potencial.

Fuente: Montes-León, Uribe-Alcántara, y García-Celis (2011)

En el estudio de (Montes-León y col, 2016) además realizaron una clasificación del grado de erosión que se presenta en el territorio nacional mostrado en el cuadro 2.

Cuadro 2. Rangos de clasificación de la erosión hídrica.

Tipo	Rango (Ton/ha/año)	Clasificación
1	< 50	Baja
2	50-100	Media
3	100-150	Considerable
4	150-200	Alta
5	200-250	Muy alta
6	> 250	Extrema

Fuente: Montes-León et al., (2011).

1.1.4 La erosión en Aguascalientes

En el estado de Aguascalientes se presentan las condiciones que promueven la erosión hídrica y eólica, por lo que cerca del 90% del territorio estatal presenta dicho problema en distintos niveles de afectación. En la figura 4 se puede observar un gráfico con los porcentajes de degradación del estado de Aguascalientes en donde el 30% del estado presenta erosión muy severa (pérdidas >75% de la superficie del suelo), 48% presenta erosión moderada a severa (pérdidas de la capa superficial del suelo que van desde el 25 al 75%), y solo en el 22% del territorio estatal se presenta erosión leve o no se manifiesta (pérdidas de suelo menores al 25% de su capa superficial) (CONABIO, IMAE, & UAA, 2010).

Por estos motivos, es necesario contar con estudios elaborados con metodologías confiables y estandarizadas para estimar la degradación de los suelos, que nos ayuden a determinar de forma eficiente el riesgo de erosión en las regiones agroecológicas del país, siendo éstas donde se presentan con mayor frecuencia problemas de erosión, debido al manejo que se le da al suelo en las actividades agrícolas y ganaderas, en donde se desprovee de su cobertura vegetal y queda expuesto a las condiciones climatológicas, acentuándose el problema en terrenos con pendientes pronunciadas, siendo estas condiciones las que desencadenan la erosión hídrica.

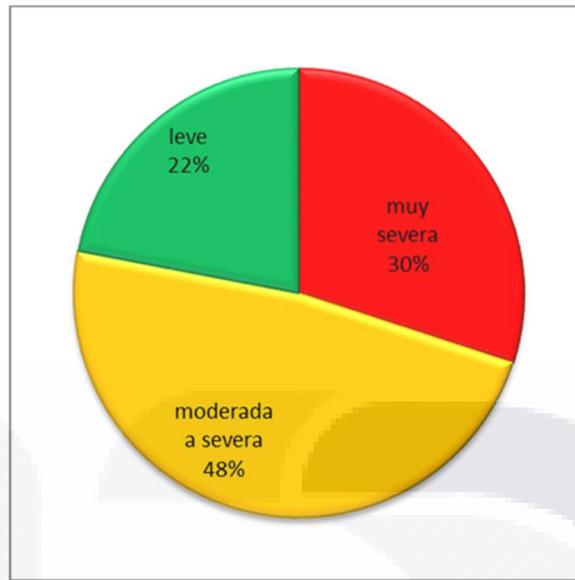


Figura 4. Porcentajes de erosión que presenta el estado de Aguascalientes.

Elaboración propia. Fuente: (Conabio y col., 2010).

1.2 La ecuación universal de pérdida del suelo

La ecuación universal de pérdida del suelo (USLE por sus siglas en inglés) se usa para determinar el promedio de la tasa de erosión del suelo para cada práctica de manejo de los cultivos en campo, asociándolo a un tipo de suelo, un patrón de precipitaciones y a una topografía determinada. La fórmula de la ecuación universal de pérdida del suelo no permite conocer el destino de la deposición de los sedimentos perdidos, ni se pueden calcular estos en las cárcavas y arroyos (Wischmeier & Smith, 1978).

La ecuación de pérdida de suelo es:

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

Donde:

A: Cantidad de suelo perdido en t/ha año

R: Índice de erosividad de la lluvia

K: Es el factor de erosionabilidad del suelo, o tasa de pérdida de suelo por unidad de índice de erosión para un suelo determinado.

L: Es el factor que representa la influencia de la longitud de la pendiente.

S: Es el factor de la pendiente en el que influyen los grados de pendiente que se tienen en una condición determinada.

C: Es el factor de cobertura y gestión.

P: Es el factor en el que se contemplan las prácticas de soporte que se realizan en campo como lo son el contorneado, cultivo en línea, entre otras.

1.2.1 Índice de erosividad de la lluvia (R)

Se podría creer que la mayor cantidad de sedimentos arrastrados se presenta en los eventos pluviales más intensos, pero contrariamente a esta creencia los datos colectados nos indican que todas las precipitaciones provocan erosión, por este motivo el factor de precipitación utilizado para determinar la pérdida media anual de suelo se debe calcular tomando en cuenta los efectos acumulativos de las precipitaciones tanto de intensidad moderada como de las tormentas severas ocasionales. El valor de R en la ecuación de pérdida de suelo debe expresar numéricamente el efecto erosivo de las gotas de lluvia en el suelo, así como su posterior cantidad y tasa de escurrimiento asociado con la lluvia.

1.2.2 Factor de la erosionabilidad del suelo (k)

El concepto de erosionabilidad del suelo es un índice que nos indica que tan susceptible o resistente es un suelo a erosionarse y en el que solo influyen las propiedades intrínsecas del suelo, así, mientras que la tasa de erosión en la ecuación de pérdida de suelos, se ve influenciada por otros factores como la pendiente del terreno, la intensidad de la lluvia, la cobertura vegetal y las gestiones

de conservación de los suelos, la erosionabilidad considera sólo las propiedades del suelo.

Determinar la erosionabilidad en campo puede ser difícil pues suelos con un bajo índice de erosionabilidad pueden mostrar problemas de erosión elevados por la influencia de lluvias intensas y pendientes prolongadas o pronunciadas, mientras que en zonas con un índice de erosionabilidad alto se puede presentar una erosión moderada cuando las pendientes son suaves o limitadas y las precipitaciones son moderadas o bien, cuando se realiza una buena gestión en el manejo de los suelos (Wischmeier y Smith, 1978). El factor K de la USLE que estima la erosionabilidad del suelo es la herramienta más utilizada para determinar la erosión (Mazllom, Emami, y Haghnia, 2016).

1.2.3 Definición del factor K

Este factor nos muestra como distintos suelos se erosionan a diferentes tasas incluso cuando los demás factores influyen por igual, y es definido como la tasa de pérdida de suelo por cada unidad adicional del índice de erosividad para un evento o (EI_{30}) permaneciendo los factores L, S, C y P de manera constante (Becerra 1999).

El factor K usado para calcular la erosionabilidad del suelo, en la USLE se determinó experimentalmente como un valor cuantitativo para un suelo en particular, siendo la tasa de pérdida de suelo por erosión. Es una unidad de índice de medida cuyo rango varía de 0 como lo menos susceptible a la erosión y 1 como lo más susceptible y es definida arbitrariamente como sigue:

Una parcela unitaria mide 22.13 metros de largo, con una pendiente uniforme del 9%, con barbecho continuo. Para este propósito la tierra se prepara para ser cultivada y se mantiene libre de vegetación por más de 2 años. Durante el periodo de mediciones para la pérdida de suelo, la parcela es arada y mantenida en condición de semillero para maíz cada primavera, labrándose según sea necesario para prevenir el crecimiento de vegetación y la formación de costras superficiales. Al cumplirse todas estas condiciones L, S, C y P son iguales a 1.0 y K es igual a

A/EI donde (A) es la tasa de pérdida de sedimentos en el año y (EI) es el índice de erosividad de la lluvia que se presentó en el año. Estos valores base fueron seleccionados para L, S y K porque son la longitud de la pendiente predominante en los campos de EU.

El manejo designado proporciona una condición que elimina casi por completo los efectos de cobertura, gestión y el uso del suelo residual y que se puede duplicar en cualquier tierra de cultivo.

Las mediciones directas de K en buenas réplicas de las parcelas unitarias como se describen reflejan los efectos combinados de todas las propiedades del suelo que influyen significativamente en la facilidad con la que un suelo en particular es erosionado por la lluvia y el escurrimiento si no tiene protección.

Sin embargo, K es un valor promedio para un suelo dado, y la medición directa del factor requiere mediciones de pérdida de suelo para un rango representativo de tamaños de tormentas y condiciones de suelo antecedentes.

Para evaluar K en suelos que no presentan una pendiente del 9%, los datos de pérdida de suelo desde parcelas que tengan todas las demás condiciones especificadas se ajustan a esta base por S (Wischmeier y Smith, 1978).

1.2.4 Factor topográfico (LS)

La longitud e inclinación de las pendientes que se presenta en campo influyen en la tasa de erosión del suelo causada por la erosión hídrica. Ambos factores se han evaluado por separado y están representados en la ecuación de pérdida de suelo como L y S respectivamente. Sin embargo, en estudios de campo es más conveniente tomar ambos factores como uno solo.

El factor LS es el más cuestionado en la USLE revisada o RUSLE. La primera razón se presenta al elegir la longitud de la pendiente, pues los usuarios pueden elegir distintas longitudes de pendiente para similares condiciones topográficas. Por lo que es necesario preguntarse: ¿qué pendiente de escurrimiento usar para representar

un área? y ¿cómo definir la pendiente en términos de longitud específica y valores de la pendiente?

La atención dada a la longitud de la pendiente no siempre es justificada, porque la pérdida de suelo frecuentemente es menos sensible a la longitud de la pendiente que a cualquier otro factor USLE/RUSLE. Para las condiciones típicas de la pendiente, un error del 10% en la longitud de la pendiente resulta en un 5% de error en el cálculo de la pérdida de suelo. En contraste la pérdida de suelo es mucho más sensible a cambios en la inclinación de la pendiente. En la USLE por ejemplo, un 10% de error en la inclinación de la pendiente pueden dar errores de alrededor del 20% en el cálculo de la pérdida de suelos (Renard et al. 2011).

1.2.5 Factor de cobertura y manejo (C)

La evaluación de la cobertura y manejo de un campo se realiza de manera conjunta por la cantidad de interrelaciones que tienen ambos conceptos. Los cultivos pueden crecer en ciclos continuos o por rotación de cultivos, por lo que influye el tiempo en que el campo está cubierto por vegetación y cuando no, influyendo igualmente en la cantidad de residuos que se pueden dejar en campo de los cultivos y el manejo del suelo.

Los residuos de los cultivos pueden incorporarse al suelo o eliminarse, esto depende de cada cultivo, su técnica de cosecha, la maquinaria empleada en cada cultivo y la cantidad de residuos de cosecha disponibles. Dependiendo también de la cantidad y disposición de las lluvias, el nivel de fertilidad y el manejo que el agricultor dé a sus tierras (Wischmeier y Smith, 1978).

1.3 Estructura (S)

La estructura del suelo es un factor clave en el funcionamiento del suelo, su capacidad para soportar la vida vegetal y animal y de moderar la calidad del medio ambiente. Una favorable estructura del suelo y la alta estabilidad de los agregados son importantes para mejorar la estabilidad del suelo, aumentar la productividad

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

agronómica, potenciando la porosidad y disminuyendo la erosionabilidad (Bronick and Lal, 2005) citado por (Osman, 2013).

El arreglo y organización de las partículas primarias y secundarias en una masa de suelo se conocen como estructura del suelo. En suelos con arcillas pesadas, todas las partículas se adhieren entre ellas por lo que la estructura de estos suelos es conocida como masiva. La estructura del suelo se clasifica en las formas de los agregados en los tipos o tamaño de peds en clases, y en distinción y estabilidad de los agregados en grados. Existen cuatro tipos de estructura del suelo. Estos son esferoidales (granulares y miga), en forma de bloque (bloque angular y bloque subangular), platellike y prismlike (prismático y columnar) (Osman, 2013).

1.4 Materia orgánica en el suelo (MOS)

La materia orgánica del suelo se compone de residuos vegetales y animales en diferentes etapas de descomposición, siendo estas desde frescos sin descomponer, materiales parcialmente descompuestos y los productos de descomposición de corta duración a bien descompuestos. La mayoría de los suelos minerales presentan menos del 5% en peso de materia orgánica del suelo (MOS), pero esta pequeña cantidad de MOS tiene una tremenda importancia biológica. Proporciona el alimento para los microorganismos, funciona como almacén de nutrientes, retiene agua, actúa como mantillo, acondicionador del suelo y agente de agregación. Hace que el suelo sea fiable y fértil, además de que la materia orgánica contribuye de manera significativa en la captura de carbono (Osman, 2013).

La materia orgánica realiza muchas funciones físicas, químicas y biológicas. Entre las funciones físicas se incluye una mejora en la agregación, aireación, movimiento del agua, y reducción de la evaporación, a mayor contenido de materia orgánica da un color más oscuro. Los residuos orgánicos que se acumulan en la superficie del suelo pueden actuar como un mantillo, la materia orgánica mejora la estructura del suelo y la porosidad, además de que reduce la escorrentía y la erosión (Olness y Archer, 2005 citado por Osman, 2013).

II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La erosión del suelo provocada por la lluvia es un fenómeno natural agravado principalmente por las actividades humanas sobre los ecosistemas terrestres como son la agricultura, ganadería extensiva y la deforestación, entre otras.

Actualmente la erosión edáfica producida por la acción del agua se considera la principal causa de la degradación del suelo en el mundo, pues debido a este fenómeno, 3.5 mil millones de hectáreas a nivel mundial tienen algún grado de deterioro, siendo en estos lugares donde habitan alrededor de 1,500 millones de personas (Nkonya y col., 2011; UNCCD, 2013; Stavi y Lal, 2014).

Sin embargo, en México no se cuenta con suficientes trabajos a largo plazo para la medición de la erosión, por lo que, la generalización de los datos de erosión que se tienen a nivel nacional, presenta grandes subestimaciones o sobreestimaciones. Esto se debe a que los pocos estudios que se tienen al respecto se basan en metodologías muy estandarizadas, en donde solo toman en cuenta algunas propiedades de los suelos, como lo son la materia orgánica y la textura, dejando fuera otras propiedades como la estructura y permeabilidad, que también influyen en el fenómeno de la erosión.

III. JUSTIFICACIÓN

No existen trabajos específicos para el caso de Aguascalientes, que permitan cuantificar la pérdida de suelo causada por la erosión hídrica, por lo que en este trabajo se hace un estudio in situ para calcular la cantidad de sedimentos arrastrados por la lluvia a lo largo de dos años, considerando el tipo de suelo. Además, con la finalidad de tener una mayor precisión, se realizaron pluviogramas en los diferentes tratamientos, que permiten cuantificar la cantidad de lluvia caída y de sedimentos perdidos en cada evento de precipitación.

IV. OBJETIVOS

4.1. Objetivo general

Calcular el factor K de la USLE con el método de referencia de la FAO y dos ecuaciones de regresión, para asociar sus resultados con las tasas de sedimentación en parcelas de escurrimiento.

4.2. Objetivos específicos

Calcular las tasas de erosión utilizando los valores K obtenidos por el método universal de la FAO y dos ecuaciones de regresión.

Comparar las tasas de erosión del suelo determinadas por el factor K calibrado de la USLE con las tasas de erosión obtenidas de las parcelas de escurrimiento en los diferentes tratamientos.

V. HIPÓTESIS

5.1. Hipótesis general

Los resultados obtenidos a partir de dos ecuaciones de regresión son más precisos que el método de referencia propuesto por la FAO.

5.2. Hipótesis particulares

La incorporación de un mayor número de variables intrínsecas al suelo permite una mejor precisión en las estimaciones del factor K.

Las tasas de erosión y la susceptibilidad del suelo a erosionarse determinadas por el factor K calibrado de la USLE (utilizando dos ecuaciones de regresión) son similares a las obtenidas de las parcelas de escurrimiento.

VI. MATERIALES Y MÉTODOS

6.1. Ubicación del área de estudio

El estudio se realizó en dos unidades experimentales ubicadas en el Centro de Ciencias Agropecuarias de la Universidad Autónoma de Aguascalientes CCA-UAA, en el municipio de Jesús María, Aguascalientes localizado en la parte Oeste del estado a 11 kilómetros de la capital estatal (figura 6). Cuenta con una superficie de 506.32 kilómetros cuadrados (INAFED, 2010). Abarca el 9 % de la superficie estatal, se encuentra entre los paralelos 21° 48' y 22° 04' de latitud Norte y los meridianos 102° 16' y 102° 36' de longitud Oeste con altitudes que van de los 1900 a 2600 metros sobre el nivel del mar, tiene 320 localidades con una población total de 120,405 habitantes (INEGI, 2015).

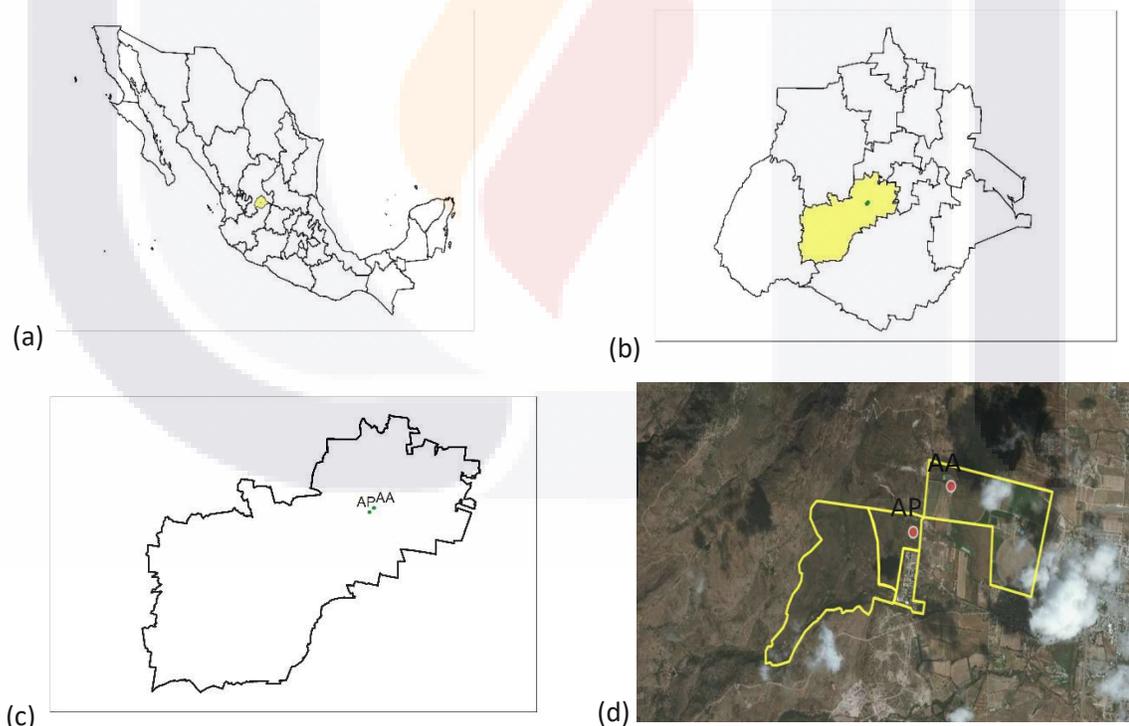


Figura 5. Ubicación de las Unidades Experimentales 1AP y 2 AA. Referencia nacional a), estatal b), municipal c) y ubicación de las Unidades experimentales d).

Unidad Experimental 1 ubicada en el área pecuaria (AP) del CCA-UAA: Se localiza en las coordenadas 21°58'23.00 de latitud norte y 102°22'27.61 de longitud Oeste. La vegetación predominante en la unidad experimental 1 está compuesta principalmente por zacate Buffel (*Cenchrus ciliaris* L.) que fue sembrado hace 10 años aproximadamente, además se puede encontrar vegetación nativa como huizaches (*Acacia farnesiana*), mezquites (*Prosopis laevigata*), entre otros. El uso principal del terreno es como agostadero para el pastoreo de ganado bovino. Las parcelas de escurrimiento instaladas en dicha unidad presentan en promedio una pendiente de 5.5 % (figura 7).



Figura 6. Unidad Experimental 1 Área Pecuaria

Unidad Experimental 2 ubicada en el área agrícola (AA) del CCA-UAA: Se localiza en las coordenadas 21°58'36.97 de latitud Norte y 102°22'12.01 de longitud Oeste. La vegetación que predomina en este lugar es el zacate Rhodes (*Chloris gayana* Kunth) el cual fue sembrado hace algunos años supliendo al maíz que se sembraba anteriormente. La vocación del terreno es para la agricultura de temporal. Las parcelas de escurrimiento instaladas en esta unidad experimental presentan una pendiente promedio del 6% (figura 8).



Figura 7. Unidad Experimental 2 Área Agrícola

6.1.1 Caracterización edáfica

El estudio se realizó en dos unidades experimentales ubicadas en una unidad de suelo de tipo (PHablep+PHlen/2) Phaeozem albico, leptico con phaeozem leptico de textura media (figura 9).

6.1.2 Descripción resumida de los Phaeozems

Estos suelos tienen una extensión aproximada de 190 millones de hectáreas a nivel mundial.

Connotación: Suelos oscuros, con abundante materia orgánica, del griego *phaios*, oscuro, y el ruso *zemlya*, tierra.

Material parental: Eólico (loess), till glaciario y otros no consolidados, con predominancia de materiales básicos.

Medio ambiente: Cálido a frío, con humedad suficiente para que exista percolación a través del suelo la mayoría de los años, pero también con periodos secos, presente en terrenos planos u ondulados, con vegetación natural de praderas como la estepa de pastos altos y/o bosque.

Uso y manejo de Phaeozems: Este tipo de suelos son porosos, fértiles y muy buenas tierras para la agricultura. La erosión del agua y del viento son un gran peligro para estos suelos. Extensas áreas de Phaeozems son utilizados para la cría y engorda de ganado con pastos mejorados (WRB, 2015).

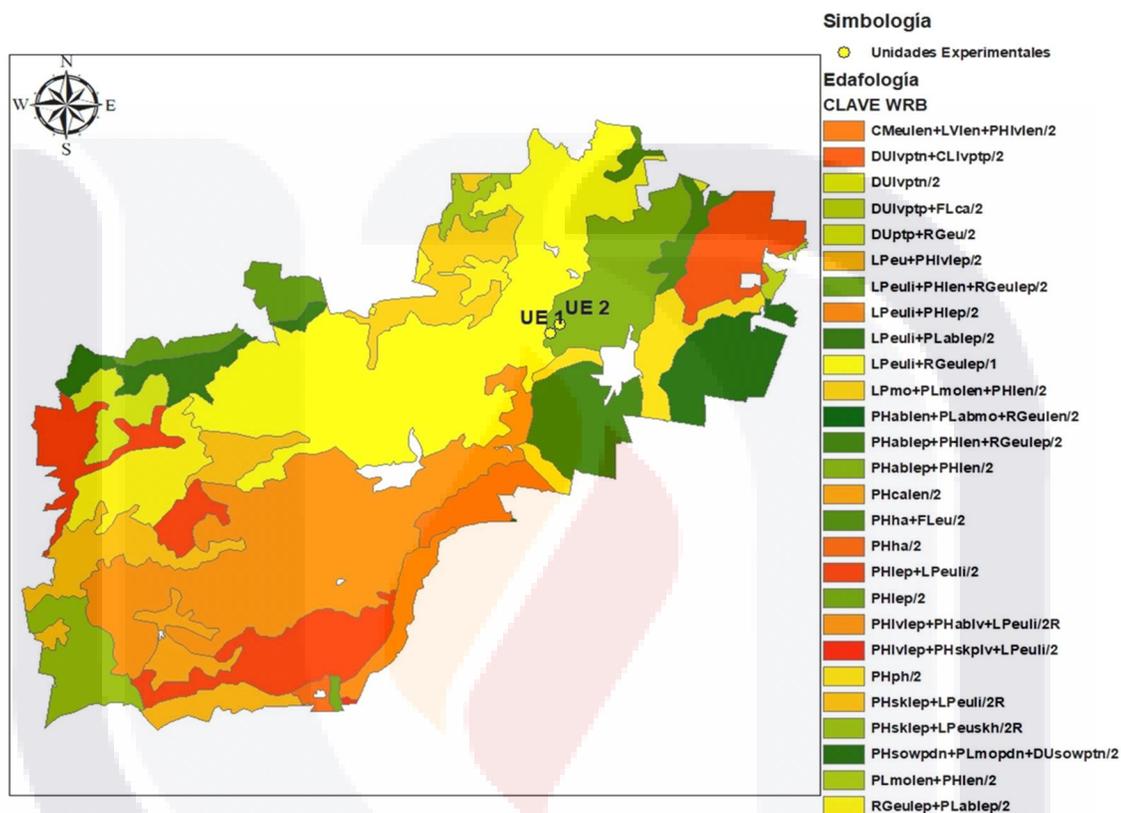


Figura 8. Unidades de suelo presentes en el municipio de Jesús María, Aguascalientes.

Fuente: INEGI. Serie II

6.1.3 Descripción del uso de suelo y vegetación en el estado de Aguascalientes

El uso de suelo y vegetación predominante en la zona donde están ubicadas las unidades experimentales se compone principalmente de pastizales y agricultura de temporal (figura 10).

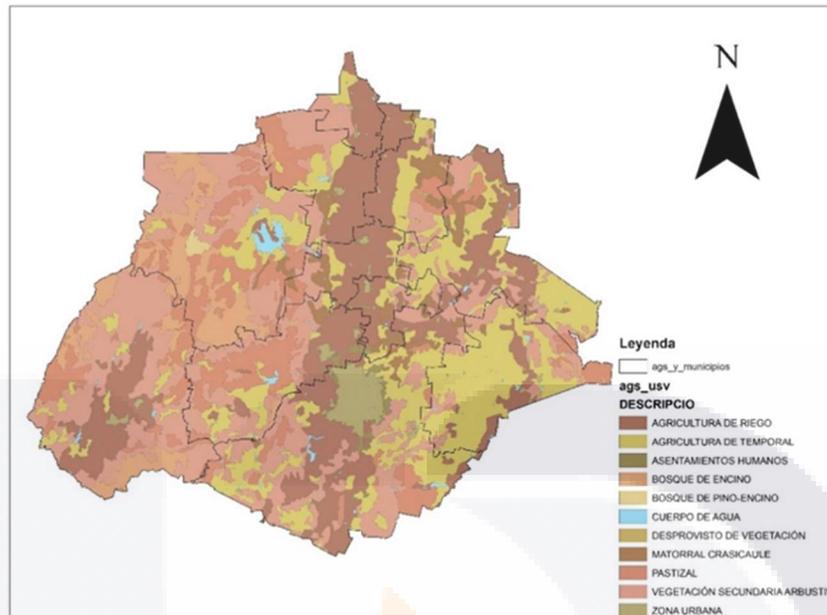


Figura 9. Uso del suelo y vegetación del estado de Aguascalientes.

Fuente: Elaboración propia con datos de la carta de uso de suelo y vegetación del INEGI.

6.1.4 Descripción de las tasas de erosión en el estado de Aguascalientes

Como se puede observar en la figura 11 las mayores tasas de erosión de suelo que se presentan en el estado de Aguascalientes se localizan en los municipios con la topografía más accidentada como lo son San José de Gracia, Calvillo, Asientos, Rincón de Romos y Jesús María, mientras que en el valle de Aguascalientes las tasas de erosión son menores debido a las condiciones de terrenos más planos. La zona donde se encuentran ubicadas las unidades experimentales presenta tasas de erosión de entre 0 a 10 t/ha/año (Santos, Martínez y col., 2017).

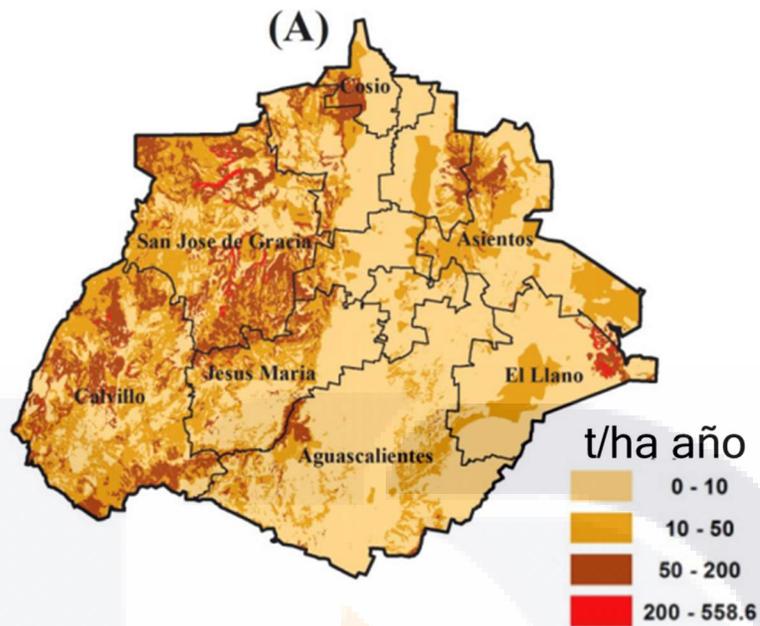


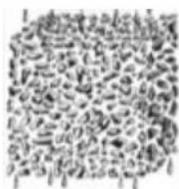
Figura 10. Grado de erosión del suelo en el estado de Aguascalientes.

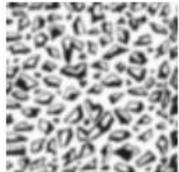
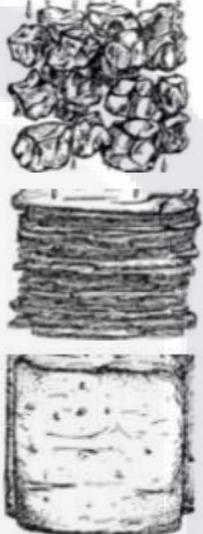
Fuente: (Santos, Martínez y col., 2017)

6.2. Determinación de estructura S

La determinación de la estructura se realizó de forma visual y al tacto. Se recomienda usar un manual para comparación. La USLE maneja sólo cuatro categorías o códigos (Cuadro 3).

Cuadro 3. Códigos de estructura del suelo de USLE.

Código USLE	Tipo de estructura	
1	Granular muy fina	

2	Granular fina	
3	Granular media a gruesa	
4	<p>Bloques</p> <p>Laminar</p> <p>Masiva</p>	

6.3 Determinación de textura y MOS

Para la determinación de la clase textural se realizó por el método del hidrómetro de Boyoucos; y la determinación del porcentaje de Materia Orgánica del suelo (MOS) se realizó por la técnica de oxidación de carbono orgánico propuesta por Walkley y Black (1934), y una vez obtenidos estos valores porcentuales de MOS se clasificaron de acuerdo con lo estipulado en la Norma Oficial Mexicana de suelos (NOM-021-RECNAT-2000) (Cuadro 4).

Cuadro 4. Clasificación de la materia orgánica con base en su porcentaje.

Clase	Materia orgánica (%)	
	Suelos volcánicos	Suelos no volcánicos
Muy bajo	< 4.0	< 0.5
Bajo	4.1 – 6	0.6 – 1.5
Medio	6.1 – 10.9	1.6 – 3.5
Alto	11.0 – 16.0	3.6 – 6.0
Muy alto	>16.1	> 6.0

Fuente: NOM-021-RECNAT-2000.

6.4 Densidad aparente y porosidad del suelo

Para la determinación de la Densidad Aparente (D_a) se realizó con el método de la probeta cuya metodología fue descrita por (Smith y Mullins, 1991). Se determinó además la Porosidad total (P_t) como se indica a continuación:

$$\rho_t = 1 - \frac{d_a}{d_r}$$

Donde:

d_a = densidad aparente

d_r = densidad real y se consideró como valor constante igual a 2.65 g/cm^3 .

6.5 Permeabilidad (P)

6.5.1 Modelo Kostiakov-Lewis para el análisis de los datos de permeabilidad

Las ecuaciones utilizadas para determinar los flujos dinámicos y estacionarios provienen de la representación del modelo empírico elaborado por Kostiakov-Lewis (1932) citado por (López y col, 2012), el cual tiene la siguiente expresión:

$$I = Kt^n$$

Donde:

I = es la velocidad de infiltración en cm/h

t = tiempo en minutos

K = Representa la velocidad de infiltración en el intervalo inicial, cuando $t = 1$

n = es igual al parámetro que indica la forma en que la velocidad de infiltración disminuye con el tiempo y fluctúa de -1 a 0.

6.5.2 Determinación de la permeabilidad

Se determinó el valor de la permeabilidad (P) en cada uno de los tratamientos en las dos unidades experimentales a partir de la conductividad hidráulica saturada (K_{hs}), esto mediante la aplicación *in situ* de pruebas de infiltración empleando un mini-infiltrómetro de doble anillo (TURF-TEC, mod. 76946) (figura 12). Se tomaron las mediciones del abatimiento de la lámina del agua cada minuto en una plantilla tomando en cuenta los tiempos muertos para rellenar de agua el mini-infiltrómetro, mismos que fueron restados hasta completar el tiempo que dura la prueba que es de 30 minutos.



Figura 11. Toma de datos de infiltración con mini-infiltrómetro de doble anillo.

Una vez obtenidos los datos se logró representar el movimiento del agua a través del perfil del suelo empleando el modelo Kostiakov-Lewis (K-L) antes descrito, con el que se puede calcular la conductividad hidráulica saturada (K_{hs}), que es el dato que necesitamos para asignarle un valor de referencia a la permeabilidad con base en el cuadro 5.

Cuadro 5. Velocidades y clases de Permeabilidad

Velocidad de infiltración (centímetros por hora)	Clases de infiltración
>50.8	Muy rápido
50.8-15.24	Moderada o rápida
15.24-5.08	Moderada
5.08-1.52	Moderada o lenta
1.52-0.51	Lenta
0.51-0.0038	Muy lenta

Fuente: USDA, 1999.

6.6 Diseño experimental

El diseño experimental es completamente aleatorizado con arreglo factorial 2 x 4 x 2; es decir que se evaluaron las variables de dos unidades experimentales, con cuatro tratamientos en cada unidad experimental, y se tomaron mediciones en los años 2017 y 2018.

6.7 Tratamientos

En el cuadro 6 se describe en que área del CCA se ubica cada unidad experimental, los tratamientos y el número de repeticiones de cada tratamiento, así como las nomenclaturas utilizadas para describir cada unidad, tratamiento y repetición.

Cuadro 6. Descripción del acomodo en campo de las parcelas de escurrimiento.

Área	Unidad Experimental	Tratamiento	Nomenclatura	Descripción	Repeticiones
Área Pecuaria AP	UE1	T1	SD	Suelo desnudo	R1
					R2
					R3
		T2	B	Barbecho	R1
					R2
					R3
		T3	BE	Barbecho con esquilmo	R1
					R2
					R3
		T4	PI	Pastizal Inducido	R1
					R2
					R3
Área Agrícola AA	UE2	T1	SD	Suelo desnudo	R1
					R2
					R3
		T2	B	Barbecho	R1
					R2
					R3
		T3	BE	Barbecho con esquilmo	R1
					R2
					R3

		T4	PI	Pastizal Inducido	R1
					R2
					R3

6.7.1 Descripción de los tratamientos

Suelo desnudo (T1): Este tratamiento consistió en remover la cubierta vegetal hasta la raíz, para dejar el suelo completamente expuesto al impacto de las gotas de lluvia (figura 13 a), esta labor se estuvo realizando durante los dos años evaluados para mantener el suelo libre de malezas la mayor parte del tiempo. El propósito de este tratamiento fue simular los disturbios que se presentan en los agroecosistemas, como lo son el sobrepastoreo, caminos, deforestación, o cualquier otra situación que mantenga al suelo desprovisto de vegetación.

Barbecho (T2): Se realizó de forma manual con talacho para retirar la cubierta vegetal, con el fin de simular de la mejor manera el efecto del arado, cuando se realiza con maquinaria agrícola. Actividad, que usualmente se realiza como parte de las labores de pre-siembra para la preparación del terreno para el establecimiento del cultivo (figura 13 b).

Barbecho con esquilmo (T3): De la misma forma como en el tratamiento anterior, se retiró la cubierta vegetal del terreno y se procedió a realizar el volteo del suelo, al terminar se colocó el material vegetal retirado anteriormente sobre la superficie del suelo, tratando de cubrir en su totalidad la superficie del tratamiento (figura 13 c). El propósito de este tratamiento es medir la eficiencia de la aplicación de esquilmo o residuos de cosecha, como alternativa para controlar el arrastre superficial de sedimentos, ya que esta técnica es muy utilizada en algunas regiones, principalmente en el Bajío donde se está practicando la agricultura de conservación o mínima labranza.

Pastizal inducido (T4): En este tratamiento se estableció zacate Buffel (*Cenchrus ciliaris* L.) en la unidad experimental 1 AP y zacate Rhodes (*Chloris gayana* Kunth)

en la unidad experimental 2 AA, esto por ser los tipos de pastos que se cultivan en cada unidad experimental (figura 13 d). El propósito de este tratamiento es evaluar la eficiencia que tienen estos pastos para evitar el arrastre de sedimentos, pues son pastos que se adaptan en gran medida a las condiciones climatológicas de la región, además de proporcionar alimento para el ganado.

Los tratamientos fueron aplicados en ambos sitios experimentales con tres repeticiones cada uno, simulando las condiciones de manejo descritas anteriormente, dentro de la superficie de las parcelas de escurrimiento.



(a)



(b)

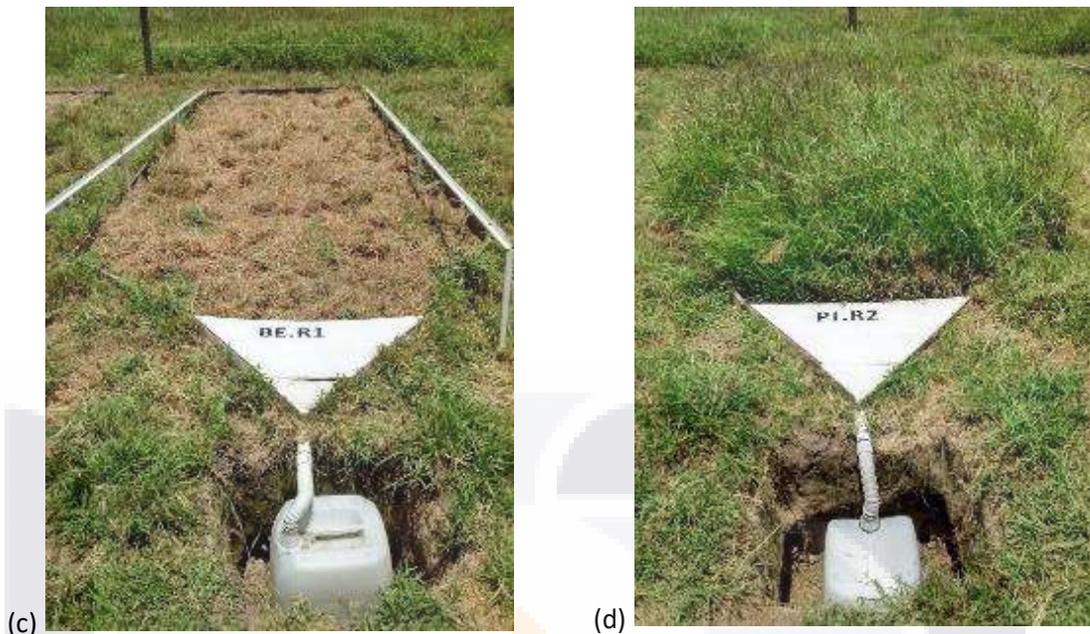


Figura 12. Tratamientos: Suelo desnudo (a); Barbecho (b); Barbecho con esquilmo (c); y Pastizal Inducido (d).

6.8. Parcelas de escurrimiento

Las parcelas de escurrimiento se establecieron en el sentido de la pendiente del terreno. Cada parcela se construyó con madera colocada de canto en forma rectangular con dimensiones de 2 m de ancho por 5.80 m de largo terminando en la parte baja en forma de embudo, con lo que la superficie de cada módulo es de aproximadamente 11 m². Al final del embudo se instalaron bandejas de conducción de flujo elaboradas de fibra de vidrio, se hizo una fosa y se colocó en esta un bidón de 50 litros para captar los escurrimientos de agua con sedimentos por gravedad. Se tuvo mucho cuidado en sellar las uniones de madera, la unión de la madera con la fibra de vidrio y la unión de la fibra de vidrio a la entrada del bidón para garantizar que los escurrimientos obtenidos eran exclusivamente del área dentro del módulo (figura 14).

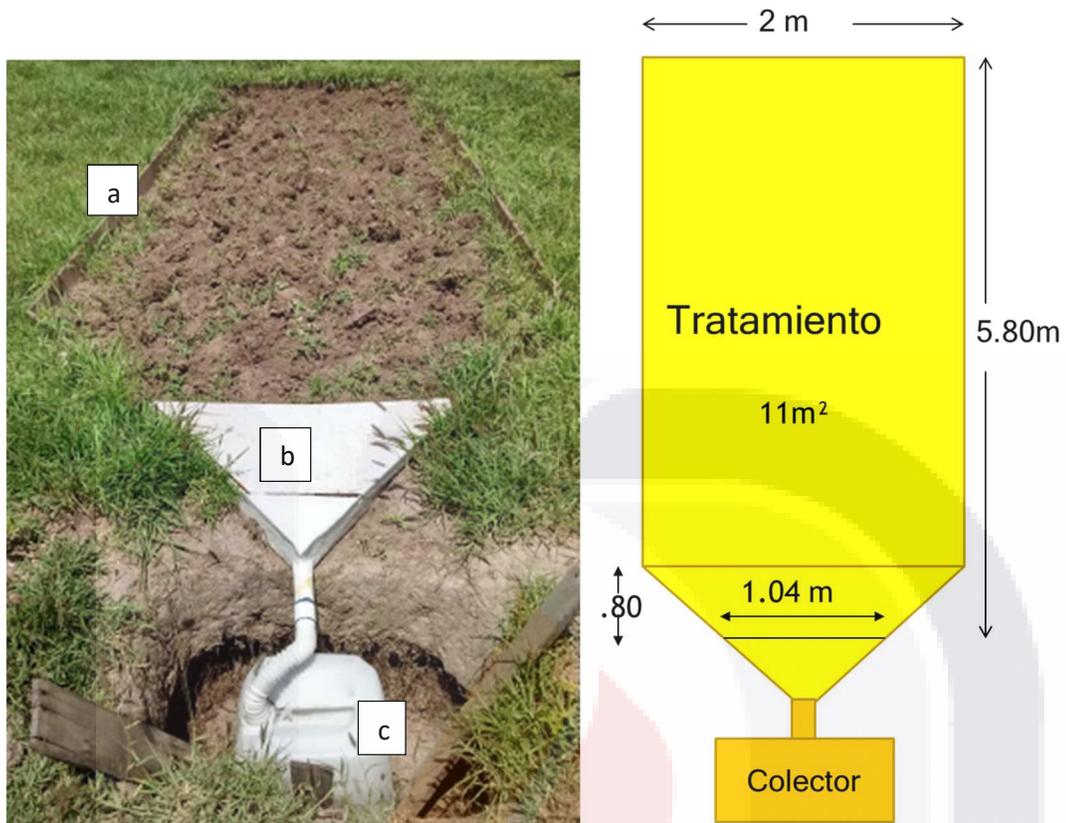


Figura 13. Diseño de las parcelas de escurrimiento

a) límite del módulo (madera) b) bandeja de conducción de flujo y c) recipiente colector.

6.9 Toma de muestras de suelo

Se realizaron dos muestreos uno en el año 2017 que permitió identificar las propiedades del suelo para determinar las tasas de erosión y otro en el 2018 para evaluar la influencia del manejo en las propiedades del suelo. Se tomó una muestra compuesta de suelo a 30 cm de profundidad. Para la toma de submuestras se utilizó el método de zig-zag en cada uno de las parcelas de escurrimiento con los diferentes tratamientos (figura 15).

Las doce muestras obtenidas en cada unidad experimental se analizaron en el laboratorio de suelos del CCA de la UAA. Para hacer los análisis cada muestra se

dejó secar en papel cartón para eliminar la humedad de campo y poder tamizar. Después de secar la muestra se pasó por un tamiz marca FIICSA con ranuras de 2 mm. Posteriormente se realizaron las pruebas de densidad aparente, textura y contenido de materia orgánica.



Figura 14. Toma de muestras de suelo en las parcelas experimentales

(a) Muestreo en zig-zag, (b) Muestra a 30 cm de profundidad, (c) tamiz con ranuras de 2 mm.

6.10 Toma de muestras y cuantificación de sedimentos

Para cuantificar la cantidad de sedimentos en cada uno de las parcelas de escurrimiento se acudía a los sitios de muestreo después de cada precipitación pluvial considerable (superior a 5 mm de precipitación). Al haber presencia de sedimentos en el bidón después del evento, se procedía a tomar una muestra de estos para posteriormente cuantificarlos en laboratorio.

La muestra se obtenía agitando el bidón con sedimentos y vaciando un litro de la mezcla en un recipiente de plástico con tapadera, se marcaba con un ID para identificar el tratamiento y la repetición de procedencia de cada muestra. Posteriormente se medía el volumen del resto de la mezcla contenida en el bidón para realizar el cálculo de los sedimentos totales que se arrastraron en la parcela.

Este procedimiento se realizaba en cada lote de escurrimiento de los dos sitios experimentales.

En laboratorio, la mezcla de sedimentos y agua contenida en el recipiente se filtraba con ayuda de embudos de cristal y utilizando papeles filtro cuantitativo de 15 cm GDO. 42 (94-15) PK-100 previamente desecados, pesados y marcados con su ID respectivo. Este procedimiento de filtrado permitía recuperar en los papeles filtro todo el sedimento contenido en la muestra.

El secado previo del papel filtro se realizaba marcando los filtros con el ID de la muestra y metiéndose en un horno de secado por 1 hora a 110°C. Del horno se pasaban inmediatamente a un desecador donde permanecían por 30 minutos hasta alcanzar temperatura ambiente. Luego se iban extrayendo del desecador y se pesaban en una báscula analítica marca Adam PGW 453e.

Los papeles filtro con los sedimentos recuperados de la muestra se pusieron en un horno de secado a 110 °C por 24 horas, luego se pasaron al desecador por otros 30 minutos y se pesaron en la báscula analítica para obtener el peso seco. Para determinar el peso seco de los sedimentos se restó el peso del papel filtro seco.

A partir del peso seco de sedimentos de la muestra y conocidos los volúmenes de muestra y escurrimiento total por lote y evento lluvioso se logró cuantificar los sedimentos en cada uno de los tratamientos y sitios experimentales (figura 16).





Figura 15. Procedimiento para la toma de muestras de sedimentos

(a) Mezclado de sedimentos en bidón, (b) Toma de muestra de 1 litro, (c) Identificación de la muestra con un ID, (d) Pesado de papeles filtro secos en laboratorio, (e) Filtrado de muestras, (f) Pesado de papeles filtros con sedimentos.

6.11 Técnicas de análisis

6.11.1 Cálculo del factor R

De acuerdo con la literatura, ninguna de las características de la lluvia contempladas por separado tiene una correlación suficiente con la pérdida de suelo provocada por la lluvia. La correlación más aceptable que se encontró fue entre dos características de la lluvia tempestuosa: la energía cinética y la intensidad máxima de la lluvia en 30 minutos.

Se utilizó el índice de erosividad presentado por Wischmeier (1959), citado por (Becerra, 1999) expresado por:

$$EI_{30} = (Ec)(I_{30})$$

En donde:

EI_{30} = índice de erosividad para un evento (MJ.mm/ha.hr)

Ec = energía cinética total de la lluvia (MJ/ha)

I_{30} = intensidad máxima de la lluvia en 30 min (mm/hr)

Wischmeier y colaboradores realizaron una ecuación para determinar la distribución entre el tamaño de las gotas de lluvia y su velocidad terminal expresada de la siguiente forma:

$$E_c = A + B (\log_{10} I)$$

Los componentes A y B pueden tomar diferentes valores numéricos, según las unidades de medida que se utilicen para la intensidad de lluvia. La versión más utilizada es la propuesta por Foster et al. (1981) citado por (Becerra, 1999) basada en el sistema internacional de medidas expresada de la siguiente forma:

$$E_{ci} = 0.119 + 0.0873 \log_{10} (I_i); \quad I_i = p_i (60/t)$$

donde:

I_i = Es la intensidad de la lluvia, en el intervalo i , expresado en mm/hr

E_{ci} = energía cinética para el intervalo de tiempo i , en MJ/ha.mm

t_i = es el tiempo del intervalo, en minutos

p_i = cantidad de lluvia en el intervalo de tiempo i , en mm

Esta ecuación solo se utiliza para intensidades menores a 76 mm, pues se considera que, a intensidades mayores, el tamaño de las gotas de lluvia ya no se incrementa, y que una parte de esta energía es absorbida por la lámina de agua que se forma sobre la superficie del suelo cuando se presentan este tipo de precipitaciones tempestuosas (Becerra 1999).

El cálculo de la energía cinética total de una tormenta se obtiene al dividir la curva del pluviograma de cada tormenta en varios segmentos, según las variaciones de intensidad que se presenten en el evento. Los datos de precipitación se obtuvieron de dos estaciones del INIFAP cercanas a las unidades experimentales que registran la precipitación en mm en intervalos de tiempo de 15 minutos. Utilizando la ecuación de la intensidad de la lluvia (I_i) y la de energía cinética (E_{ci}) para cada segmento de

15 minutos, multiplicamos el resultado por la cantidad de lluvia con esa intensidad y sumando los resultados parciales como se muestra con la siguiente fórmula:

$$Ec = \sum_{i=1}^n Eci pi$$

Donde:

Ec = Energía cinética total para el evento, en MJ/ha

n = Número de intervalos con diferente intensidad durante el mismo evento

Eci y pi ya fueron definidas

Con todo lo anterior la expresión algebraica de R es:

$$R = \sum_{i=1}^m (EI30)i$$

donde:

R = Es el factor de erosividad de la lluvia expresado en MJ/ha.año

m = Número de eventos durante el año

6.11.2 Cálculo del factor K por el método de las ecuaciones de regresión

Estas fórmulas son utilizadas para medir el fenómeno de la erosión (hídrica). Consisten en determinar la vulnerabilidad que tiene una superficie de suelo determinado para identificar la capacidad de éste a resistir la erosión. Para nuestro caso de estudio se determinó por dos métodos, FK_{ws} la ecuación (1) elaborada por Wischmeier y Smith (1978), y FK_γ la ecuación (2) desarrollada por Yang (1999), citado por Wang et al. (2013), quien desarrolló una ecuación del nomograma revisada, basada en muchos años de datos de parcelas de escurrimiento natural

obtenidas de la región montañosa del noreste de la provincia de Yunnan, China. Las expresiones de estas ecuaciones son las siguientes:

$$K = \left[\frac{2.1 \times 10^{-4}(12 - MO)M^{1.14} + 3.25(S - 2) + 2.5(P - 3)}{100} \right] \quad (1)$$

$$K = \left[\frac{2.737 \times 10^{-4}(12 - MO)M^{1.14} + 4.236(S - 2) + 2.259(P - 3)}{100} \right] \quad (2)$$

Dónde:

MO= Porcentaje de materia orgánica en la capa superficial del suelo.

M = (% limo+%Arena muy fina) * (100-%arcilla)

S = Clase de estructura, que toma los valores: 1 (gránulo muy fino y grumo fino); 2 (gránulo fino y grumo fino); 3 (gránulo medio y grueso, grumo medio); 4 (gránulo liso, prismático, columnar y muy grueso).

P = Clase de permeabilidad, que toma los valores: 1 (muy rápida a rápida); 2 (medianamente rápida); 3 (moderada); 4 (moderadamente lenta); 5 (lenta); 6 (muy lenta).

Además, los valores obtenidos de K fueron ajustados. Para esto se utilizó 0.1317 como un coeficiente de conversión de unidades del sistema inglés al sistema métrico propuesto por Foster y col. (1981), y así obtener FK en t h MJ mm.

6.11.3 Cálculo del factor K por el método de las parcelas de escurrimiento

El factor K se puede evaluar mediante el uso de parcelas de escurrimiento en campo, resolviendo alguna de las ecuaciones siguientes (Becerra, 1999):

$$K = A/RLSCP \text{ para condiciones no estándar, o}$$

$K = A/R$ para condiciones estándar (parcelas USLE)

6.11.4 Cálculo del factor K por el método de referencia FK_T

Otra forma de determinar el factor K, es con los datos de MOS y grupo textural. Con base en la relación de las dos variables anteriores, es posible utilizar el método que propone el uso de indicadores de magnitud general de erosionabilidad propuestos por USDA-ARS (Kirkby y Morgan, 1980), (Cuadro 7).

Cuadro 7. Factores de erosionabilidad del suelo asociados a la textura y contenido de MOS.

Clase textural	Valor de K de acuerdo con el porcentaje de MO		
	0.5 %	2 %	4 %
	----- (t h / MJ mm) -----		
Arena	0.007	0.004	0.003
Arena fina	0.021	0.080	0.013
Arena muy fina	0.055	0.047	0.037
Arena franca	0.016	0.013	0.011
Arena fina franca	0.032	0.026	0.021
Arena muy fina franca	0.058	0.050	0.04
Franco Arenoso	0.036	0.032	0.025
Franco arenoso fino	0.046	0.040	0.032
Franco arenoso muy fino	0.062	0.054	0.043
Franco	0.05	0.045	0.038
Limo franco	0.063	0.055	0.043
Limo	0.079	0.068	0.055
Franco arenoso arcilloso	0.036	0.033	0.028
Franco arcilloso	0.037	0.033	0.0 28
Franco arcilloso limoso	0.049	0.042	0.034
Arcilla arenosa	0.018	0.017	0.016

Arcilla limosa	0.033	0.03	0.025
Arcilla	0.017 – 0.038		

Fuente: Kirkby y Morgan (1980)



VII. Resultados

En este apartado se describen los resultados que se obtuvieron en el presente estudio. Correspondiendo esta sección a las determinaciones físicas y mecánicas del suelo (textura, densidad aparente, porosidad total, materia orgánica del suelo, color del suelo, tasa de infiltración y permeabilidad) además del cálculo del factor K en ambas unidades experimentales. En la siguiente sección se muestran los resultados de la pérdida de suelo bajo los diferentes tipos de manejo para las dos unidades experimentales.

7.1 Caracterización edáfica

En el año 2017 se realizó la caracterización edáfica para las cuatro propiedades necesarias para la determinación de la erosionabilidad edáfica. 1) proporción relativa de minerales primarios (arena, limo, arcilla), 2) la relación entre la masa y el volumen (d_a y p_t), y 3) materia orgánica del suelo. Los resultados señalan que el porcentaje de arenas en la UE 1 ronda el 44 % para la mayoría de los tratamientos, mientras que los porcentajes de limos y arcillas son cercanos entre sí, por lo que la clase textural en todos los tratamientos de la UE 1 es Franca (F); en tanto que para la UE 2, los porcentajes de arena estuvieron alrededor del 32%, mientras que se presentan porcentajes de limos y arcillas mayores, dando como resultado una textura Franco Arcillosa (Fa).

En cuanto a los contenidos de materia orgánica para la UE 1 variaron de acuerdo al tratamiento, siendo de 0.8 y 1.3% para los tratamientos 1 y 2 respectivamente, lo que los ubica según los valores de referencia en un nivel bajo de MOS, en cuanto a los tratamientos 3 y 4 se obtuvieron porcentajes de 2.5 y 2.4 respectivamente lo que los ubica en un nivel medio. En la UE 2 el porcentaje de materia orgánica fue de 1.6 para los tratamientos 1 y 2 ubicándose en un nivel medio y de 1.4 para los tratamientos 3 y 4 siendo este valor un contenido bajo. La d_a tuvo un valor medio

de 1,288 kg m³ en los tratamientos de la UE 1, mientras que para la UE 2 fue de 1,305 kg m³ (Cuadro 8).

Cuadro 8. Caracterización inicial para determinar erosionabilidad por sitio muestreado para el año 2017.

trat	Arenas	Limos %	Arcillas	Textura Clase	da Kg m ³	Pt -----%-----	MOS Clase
T1 AP	42.4	32.4	25.2	F	1,291	51.3	0.8 Bajo
T2 AP	44	30.4	25.6	F	1,333	49.7	1.3 Bajo
T3 AP	44	32.4	23.6	F	1,251	52.8	2.5 Medio
T4 AP	44.4	30.4	25.2	F	1,278	51.8	2.4 Medio
T1 AA	31.9	37.1	31	Fa	1,333	49.7	1.6 Medio
T2 AA	31.9	38.4	29.7	Fa	1,333	49.7	1.6 Medio
T3 AA	31.9	39.8	28.4	Fa	1,263	52.3	1.4 Bajo
T4 AA	32.1	36.4	31.5	Fa	1,290	51.3	1.4 Bajo

Trat = tratamiento; F = Franca; Fa = Franco Arcillosa; da = densidad Aparente; Pt = Porosidad total; MOS = Materia Orgánica del Suelo.

Por otra parte, en el año 2018 los resultados señalan que los porcentajes de arenas en la UE 1 fueron altas, en promedio de 43%, mientras que los contenidos de limos y arcillas están cercanos entre sí, por lo que la clase textural es Franca (F), en tanto que para la UE 2 los porcentajes de arena se encuentran en 33% en promedio entre los tratamientos, mientras que los porcentajes de limos y arcillas se encuentran cercanas entre sí dando una textura Franco Arcillosa (Fa) por lo que se puede decir que no existe una variación importante respecto al primer año comprobando que es una propiedad muy estable.

En cuanto a los contenidos de materia orgánica para la UE 1, éstos variaron de acuerdo al tratamiento, siendo de 1.4 para los tratamientos 1 y 2, lo que les da una calificación baja, en cuanto a los tratamientos 3 y 4 obtuvieron porcentajes de 2.4 y 1.7 respectivamente, lo que les da una calificación media en cuanto a MOS. Por otra parte, en la UE 2 el porcentaje de materia orgánica varió de 1.4 para los tratamientos 1 y 2 dándoles una calificación baja, de 1.8% para el tratamiento 3 dándole una calificación media y de 1.5% para el tratamiento 4 recibiendo una calificación baja en cuanto a M.O. La *da* tuvo un promedio de 1,297 kg m³ en los tratamientos de la

UE 1, mientras que para la UE 2 fue de 1,264 kg m³ por lo que no hubo una gran variación en la *da* entre un año y otro (cuadro 9).

Cuadro 9. Caracterización inicial para determinar erosionabilidad por sitio muestreado para el año 2018.

Trat	Arenas	Limos	Arcillas	Textura Clase	Da Kg m ³	Pt -----%-----	MOS Clase
T1 AP	43.8	30.3	26	F	1,305	50.8	1.4 Bajo
T2 AP	43.8	29.6	26.6	F	1,333	49.7	1.4 Bajo
T3 AP	42.3	31.6	26.2	F	1,257	52.6	2.4 Medio
T4 AP	41.6	32.3	26.1	F	1,291	51.3	1.7 Medio
T1 AA	32	33.2	34.8	Fa	1,284	51.5	1.4 Bajo
T2 AA	32.7	32.2	35.1	Fa	1,304	50.8	1.4 Bajo
T3 AA	35.6	31.9	32.5	Fa	1,219	54	1.8 Medio
T4 AA	30.5	35.2	34.2	Fa	1,250	52.8	1.5 Bajo

Trat = tratamiento; 1 = Arenas; 2 = Limos; 3 = Arcillas; F = Franca; Fa = Franco Arcillosa.

7.1.1 Color del suelo

Como parte de la descripción morfológica, se determinó el color del suelo, en seco y húmedo, tomando como referencia la tabla de colores Munsell, para la identificación del color de cada muestra de suelo, las cuales presentaron una variación de café (7.5 YR 5/2) para el suelo en seco, a negro muy oscuro (7.5 YR 3/1), para el suelo en húmedo. Por la similitud en el color que presentan los suelos de ambas unidades experimentales se puede confirmar que se trata de la misma unidad de suelo de tipo Phaeozem, pues reúnen las características morfológicas de esta unidad de suelo (figura 17).

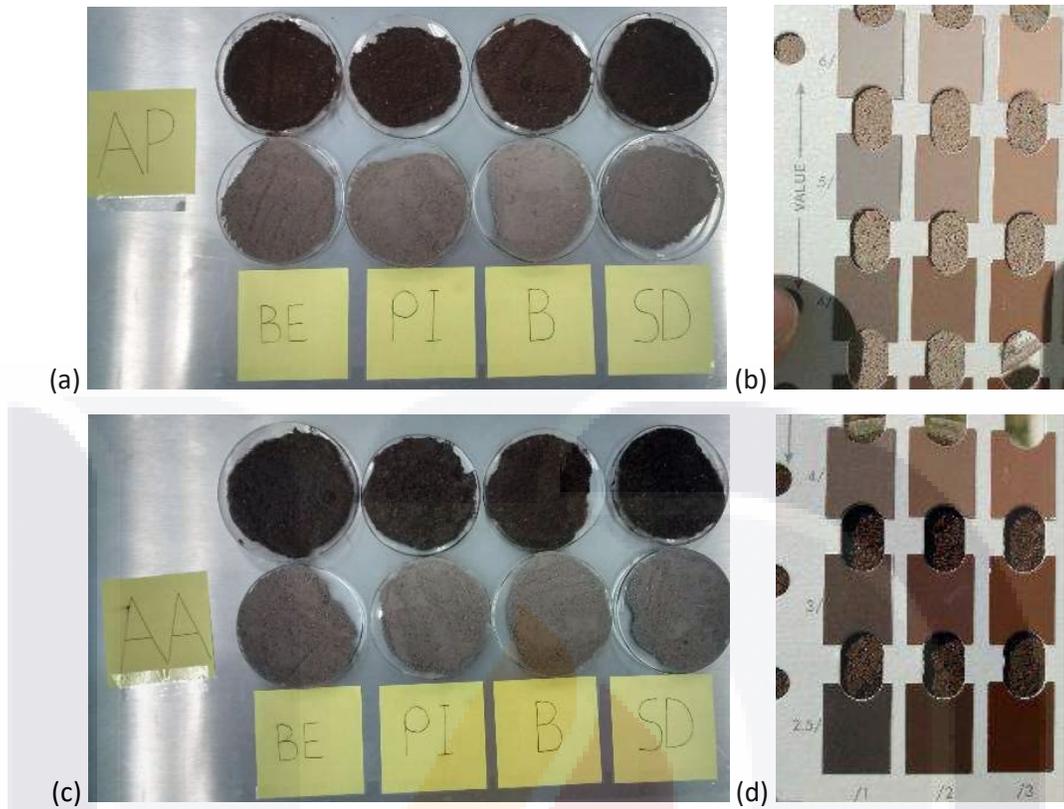
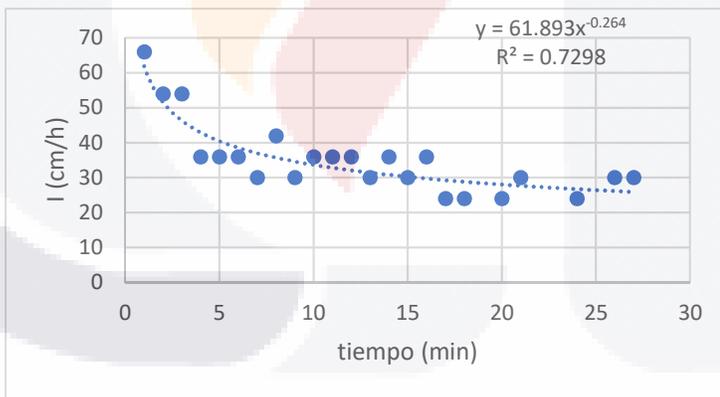
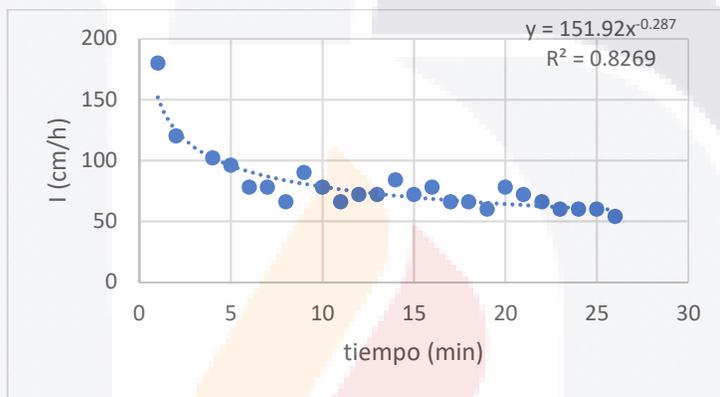
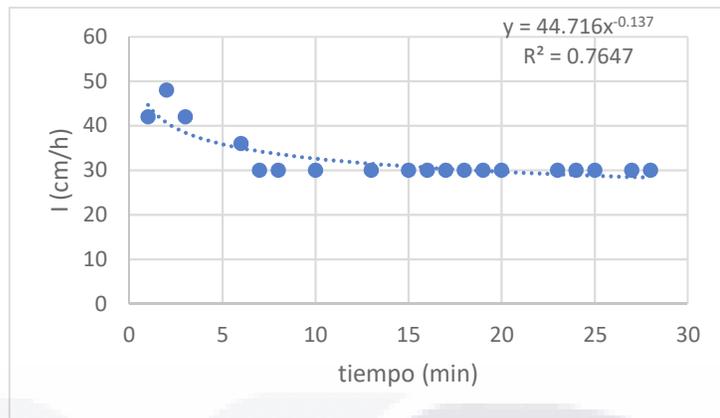


Figura 16. Muestras de suelo evaluadas en seco y húmedo de la UE 1 y 2 (a y c) y hojas de la tabla de colores Munsell en seco b) y húmedo d).

7.1.2 Determinación de la Permeabilidad (P)

La permeabilidad del suelo se determinó a partir de pruebas de infiltración *in situ*. Esto permitió distinguir el movimiento del agua en el suelo en condiciones saturadas e insaturadas. La primera, es conocida como flujo dinámico o transitorio (Ft), mientras que la segunda es conocida como flujo estacionario (Fe). La duración de las pruebas de infiltración fue de 30 minutos para cada tratamiento en las dos unidades experimentales, de tal manera que los cambios de sucesión de Ft a Fe se presentaron aproximadamente a los 15 minutos de iniciada la prueba (figura 18).



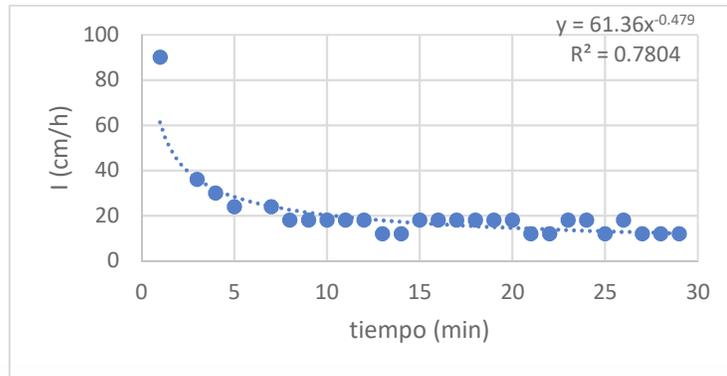
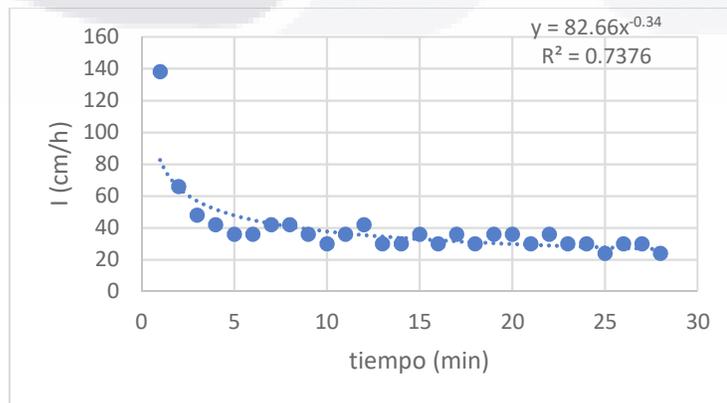


Figura 17. Comportamiento gráfico promedio del movimiento del agua a través del perfil del suelo en 30 minutos para el T1, T2, T3 y T4 de la UE 1 (AP).

Las mismas pruebas de infiltración se realizaron para la Unidad experimental 2 (AA) donde se obtuvieron los siguientes resultados (Figura 19).



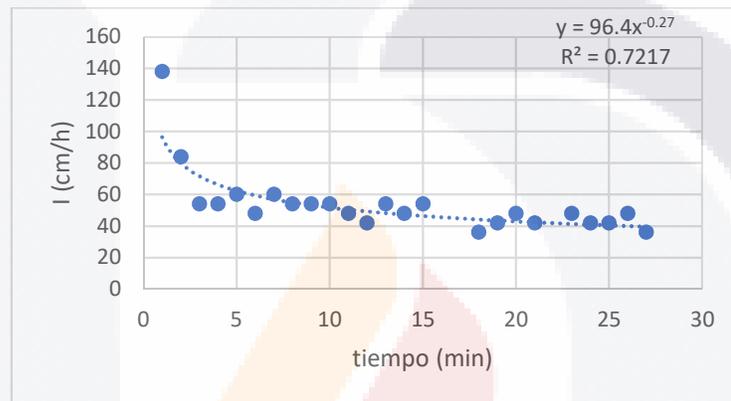
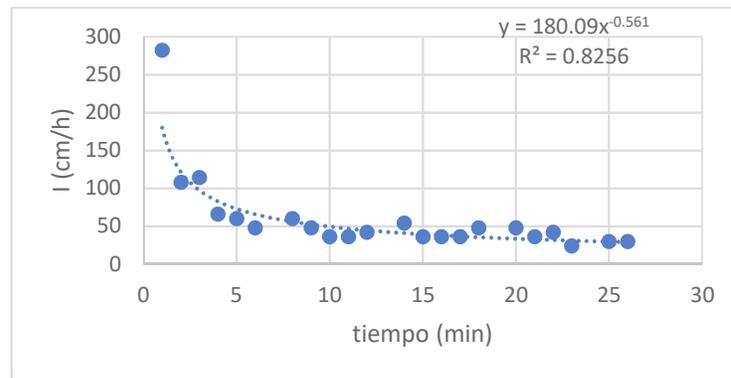


Figura 18. Comportamiento gráfico promedio del movimiento del agua a través del perfil del suelo en 30 minutos para el T1, T2, T3 y T4 de la UE 2 (AA).

Con los valores de infiltración obtenidos en campo para los cuatro tratamientos (T1) Suelo desnudo, (T2) Barbecho, (T3) Barbecho con esquilmo y (T4) Pastizal Inducido establecidos en las dos unidades experimentales UE 1 Área Pecuaria y UE 2 Área Agrícola, se logró obtener los modelos potenciales negativos, los cuales presentaron coeficientes de estimación suficientemente confiables por tener valores (R^2) que variaron de 0.72 a 0.83. Por medio de estos modelos, fue posible calcular las tasas de infiltración en cm/h, para las condiciones de flujo transitorio o dinámico (Kh_{te}) y para el flujo estacionario (Kh_{se}). Donde finalmente se pudo observar que en la unidad experimental 1 (AP), el tratamiento que presenta una mayor conductividad hidráulica fue el T2 con 2.2 y 1.8 cm/h para Ft y Fe respectivamente, mientras que en la unidad experimental 2 (AA) los tratamientos con mayor conductividad

hidráulica fueron el T4 con un F_e de 1.6 cm/h y el T3 con un F_t de 2.3 cm/h (cuadro 10).

Cuadro 10. Tasas de infiltración inicial y final para F_t y F_e , medidos en campo y estimados con base en 8 modelos K-L con diferentes valores de R^2 .

Trat	Modelo K-L	R^2	-----Medidos-----				-----Estimados-----			
			t_i	T_f	Kh_{tm}	Kh_{sm}	Kh_{te}	Kh_{se}	F_t	F_e
			---min---	----- cm h -----						Log I (cm h)
T1 AP	$I = 44.716x^{-0.137}$	0.76	1	30	36	30	45	28	1.7	1.4
T2 AP	$I = 151.92x^{-0.287}$	0.83	1	30	102	72	152	57	2.2	1.8
T3 AP	$I = 61.893x^{-0.264}$	0.73	1	30	36	30	62	25	1.8	1.4
T4 AP	$I = 61.36x^{-0.479}$	0.78	1	30	36	12	61	12	1.8	1.1
T1 AA	$I = 45.726x^{-0.32}$	0.72	1	30	30	18	46	15	1.7	1.2
T2 AA	$I = 82.66x^{-0.34}$	0.74	1	30	66	30	83	26	1.9	1.4
T3 AA	$I = 180.09x^{-0.561}$	0.83	1	30	108	36	180	27	2.3	1.4
T4 AA	$I = 96.4x^{-0.27}$	0.72	1	30	84	42	96	38	2	1.6

Trat = Tratamiento; I = tasa de infiltración en cm h; t_i = tiempo inicial; T_f = tiempo final; min = minutos; Kh_{tm} = conductividad hidráulica inicial medida *in situ*; Kh_{sm} = conductividad hidráulica a saturación medida *in situ*; Kh_{te} = conductividad hidráulica transitoria estimada; Kh_{se} = conductividad hidráulica saturada estimada; log = logaritmo con base 10.

7.1.3 Determinación del factor K

La erosionabilidad o factor K, fue cuantificada por medio de los parámetros definidos anteriormente y conforme a lo establecido en la metodología de la (ecuación 1). El tratamiento que presentó el valor promedio más alto de (FK_{ws}) para la unidad experimental 1 (AP) fue el T1 con 0.06455 t h MJ mm, mientras que para la unidad experimental 2 (AA), el tratamiento que presentó el valor promedio más alto de (FK_{ws}), fue el T2 con 0.05331 t h MJ mm (cuadro 11).

Comparando estos valores con los obtenidos por medio de la (ecuación 2), el valor promedio para (FK_{γ}) del tratamiento T1 (AP), fue de 0.08149 t h MJ mm, mientras

que para la (AA) el tratamiento T3 fue el que obtuvo el mayor valor promedio de (FK_Y), que fue de 0.06756 t h MJ mm.

El análisis de los datos del cuadro 11, muestra diferencias significativas entre FK_{WS} y FK_Y de 0.0169 t h MJ mm, para T1 del (AP) y de 0.0135 ton h MJ mm para el T2 del (AA). Dicha diferencia representa una sobreestimación que en promedio tienen una magnitud 0.26 veces mayor para FK_Y respecto FK_{WS} , para el T1 del (AP) y de 0.25 veces para el T2 del (AA).

En tanto el factor K basado en las tablas de referencia FK_T , se tiene en primer lugar el T1 y el T2 del (AP) como los tratamientos más susceptibles a la erosión con 0.05 ton h MJ mm, mientras para la (AA) todos los tratamientos son igual de susceptibles a la erosión, con 0.037 ton h MJ mm.

El análisis de los datos del cuadro 11, muestra diferencias significativas entre FK_{WS} y FK_T de -0.0145 ton h MJ mm, para el tratamiento más susceptible a la erosión calculado con el FK_{WS} T1 del (AP), así como de -0.01631 ton h MJ mm para el tratamiento más susceptible calculado con el FK_{WS} T2 del (AA). Dichas diferencias representan subestimaciones, que en promedio tienen una magnitud de 0.22 veces menores para FK_T respecto FK_{WS} en el tratamiento T1 del (AP) y de 0.28 veces menor en el T1 del (AA), respectivamente.

Los resultados de los análisis realizados en el año 2017 para la unidad experimental 1 (AP), arrojaron que el contenido de materia orgánica varió según el tipo de manejo que se le ha venido dando a las parcelas de escurrimiento desde el año 2016, siendo el T3 el tratamiento con mayor contenido de materia orgánica 2.5%, seguido del T4 con 2.4%, mientras que los tratamientos con menor contenido de materia orgánica fueron el T1 con solo 0.8% y el T2 con 1.3%. Por otra parte, en la unidad experimental 2 (AA) los porcentajes variaron muy poco, de 1.6% para los tratamientos T1 y T2 y de 1.4% para los tratamientos T3 y T4.

Cuadro 11. Parámetros empleados para calcular el factor K en las unidades experimentales 1 (AP) y 2 (AA) para el año 2017.

trat	textura	MOS%	M	S	P	FK_{WS}	FK_Y	FK_T
	Clase	-----Parámetros Ec-----				<i>T h MJ mm</i>		
T1 AP	F	0.8	5593.9	2	4	0.06455	0.08149	0.05
T2 AP	F	1.3	5536.5	2	4	0.05786	0.07409	0.05
T3 AP	F	2.5	5837.3	2	4	0.05823	0.07326	0.047
T4 AP	F	2.4	5600.1	2	4	0.05648	0.07098	0.047
T1 AA	FA	1.6	4764.5	2	5	0.05160	0.06462	0.037
T2 AA	FA	1.6	4943.9	2	5	0.05331	0.06685	0.037
T3 AA	FA	1.4	5128.6	2	4	0.05285	0.06756	0.037
T4 AA	FA	1.4	4691.3	2	4	0.04827	0.06159	0.037

FK_{WS} = FK basado en Wischmeier y Smith (1978); FK_Y = FK estimado con la ecuación revisada por Yang (1999) citado por (Wang et al. 2013); FK_T = FK basado en tablas de referencia FAO; F = Franca; FA = Franco Arcillosa.

Por otra parte la erosionabilidad o factor K, cuantificada en el año 2018 por medio de los parámetros definidos anteriormente y conforme a lo establecido en la metodología de la (ecuación 1.) El tratamiento que presentó el valor promedio más alto de (FK_{WS}) para la unidad experimental 1 (AP), continuó siendo el T1 con 0.06024 t h MJ mm, mientras que para la unidad experimental 2 (AA) el tratamiento que presentó el valor promedio más alto de (FK_{WS}) fue el T1 con 0.04667 t h MJ mm (cuadro 12), comparando estos valores con los obtenidos por medio de la (ecuación 2), el valor promedio para (FK_Y) del tratamiento T1 (AP) fue de 0.07588 t h MJ mm mientras, que para la (AA) el tratamiento T1 fue el que obtuvo el mayor valor promedio de (FK_Y), que fue de 0.05819 t h MJ mm.

El análisis de los datos del cuadro 12, muestra diferencias entre FK_{WS} y FK_Y de 0.0156 ton h MJ mm para T1 del (AP) y de 0.0115 ton h MJ mm para el T1 del (AA). Dicha diferencia representa una sobreestimación que en promedio tiene una magnitud 0.26 veces mayor para FK_Y respecto FK_{WS} para el T1 del (AP) y de 0.25 veces para el T1 del (AA).

En tanto el factor K basado en las tablas de referencia FK_T , los tratamientos T1 y T2 siguen siendo los más susceptibles a la erosión en el (AP) con 0.05 ton h MJ mm, mientras para la (AA) todos los tratamientos siguen siendo igual de susceptibles a la erosión con 0.037 ton h MJ mm.

El análisis de los datos del cuadro 12, muestra diferencias significativas entre FK_{WS} y FK_T de -0.0102 ton h MJ mm para el tratamiento más susceptible a la erosión calculado con el FK_{WS} , que fue el T1 del (AP), así como de -0.0097 ton h MJ mm para el tratamiento más susceptible, calculado con el FK_{WS} T1 del (AA). Dichas diferencias representan subestimaciones, que en promedio tienen una magnitud de 0.17 veces menores para FK_T respecto FK_{WS} en el tratamiento T1 del (AP) y de 0.21 veces menor en el T1 del (AA).

Los resultados de los análisis realizados en el año 2018 para la unidad experimental 1 (AP), arrojaron que el contenido de materia orgánica varió según el tipo de manejo que se le ha venido dando a las parcelas de escurrimiento desde el año 2016, siendo el T3 el tratamiento con mayor contenido de materia orgánica 2.4%, seguido del T4 con 1.7%, mientras que los tratamientos con menor contenido de materia orgánica fueron el T1 y T2 con sólo 1.4% cada uno. Por otra parte, en la unidad experimental 2 (AA) los porcentajes de materia orgánica en este año comenzaron a variar siendo el T3 el que presentó el mayor porcentaje de MO con 1.8% seguido del T4 con 1.5%, mientras que los tratamientos T1 y T2 se encuentran en 1.4%.

Cuadro 12. Parámetros empleados para calcular el factor K en las unidades experimentales 1 (AP) y 2 (AA) para el año 2018.

trat	textura	MOS%	M	S	P	FK_{WS}	FK_Y	FK_T
	Clase	-----Parámetros Ec-----				<i>T h MJ mm</i>		
T1 AP	F	1.4	5483.2	2	5	0.06024	0.07588	0.05
T2 AP	F	1.4	5391.9	2	4	0.05615	0.07187	0.05
T3 AP	F	2.4	5450.6	2	5	0.05471	0.06867	0.047
T4 AP	F	1.7	5455.7	2	5	0.05833	0.07339	0.048
T1 AA	FA	1.4	4260.7	2	5	0.04667	0.05819	0.037

T2 AA	FA	1.4	4212.5	2	5	0.04615	0.05751	0.037
T3 AA	FA	1.8	4555.9	2	4	0.04527	0.05768	0.037
T4 AA	FA	1.5	4343.6	2	4	0.04403	0.05608	0.037

FK_{WS} =FK basado en Wischmeier y Smith (1978); FK_Y = FK estimado con la ecuación revisada por Yang (1999) citado por (Wang et al. 2013); FK_T =FK basado en tablas de referencia FAO; F = Franca; FA = Franco Arcillosa.

7.2 Pérdida de suelo medido en las parcelas de escurrimiento

De acuerdo con la evaluación a los cuatro tipos de manejo que se establecieron en las dos unidades experimentales, para el año 2017, los tratamientos que presentaron la mayor cantidad de pérdida de suelo, fue el T1AP con un promedio de (9.503 t/ha/año), seguido del T1AA con (4.475 t/ha/año), T2AA con (1.962 t/ha/año), T2AP con (1.523 t/ha/año). Mientras que los tratamientos que registraron menor pérdida de suelo fueron T4AA con (1.114 t/ha/año), T3AA con (0.656 t/ha/año), T4AP con (0.007 t/ha/año) y el tratamiento que presentó menor erosión fue T3AP con (0.005 t/ha/año) (figura 20).

Cabe mencionar que el tratamiento T4AA que es el pastizal inducido presentó pérdidas de sedimentos muy por encima de lo esperado para dicho tratamiento, esto se debió principalmente a que en el año 2017 se establecieron las parcelas de escurrimiento en el Área Agrícola y se sembró el pasto por lo que al presentarse las primeras lluvias el pasto no estaba bien establecido y se generaron fuertes escurrimientos superficiales.

Se realizó una prueba múltiple de medias de Tukey con una confianza del 95% entre los cuatro tratamientos, de cada una de las unidades experimentales encontrando diferencias significativas entre los tratamientos T1AP y T1AA, mientras que los tratamientos T2AA, T2AP y T4AA no tuvieron diferencias significativas entre ellos ni con los tratamientos T1AA, T3AA, T4AP y T3AP, por otro lado, estos tres últimos tratamientos son significativamente diferentes a los tratamientos T1AP y T1AA (figura 20).

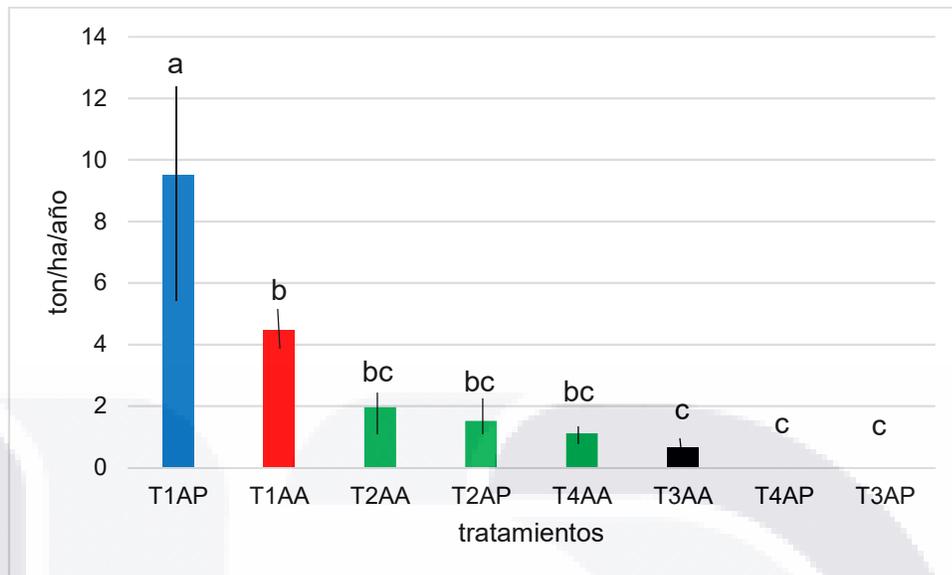


Figura 19. Cantidad de suelo perdido en cada tratamiento de las Unidades Experimentales 1 (AP) y 2 (AA) en el año 2017.

Realizada con la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$). Tratamientos con la misma letra son estadísticamente iguales

Por otra parte, la evaluación a los cuatro tipos de manejo que se establecieron en las dos unidades experimentales, para el año 2018 los tratamientos que presentaron la mayor cantidad de pérdida de suelo fueron el T1AP, con un promedio de (9.489 t/ha/año), seguido del T1AA con (6.033 t/ha/año), T2AP con (3.082 t/ha/año) y T2AA con (2.086 t/ha/año). Mientras que los tratamientos que registraron menor pérdida de suelo fueron el T3AA con (0.029 t/ha/año), T4AA con (0.014 t/ha/año), T4AP con (0.010 t/ha/año) y T3AP con (0.008 t/ha/año) (figura 21).

De la misma forma se realizó la prueba múltiple de medias de Tukey con una confianza del 95% entre los cuatro tratamientos de cada una de las unidades experimentales donde no se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos T1AP y T1AA, los tratamientos T2AP y T2AA no presentan diferencia significativa entre ellos y entre T1AA, T3AA, T4AA, T4AP, T3AP, pero estos últimos cuatro si presentan diferencia significativa respecto a los tratamientos T1AP y T1AA (figura 21).

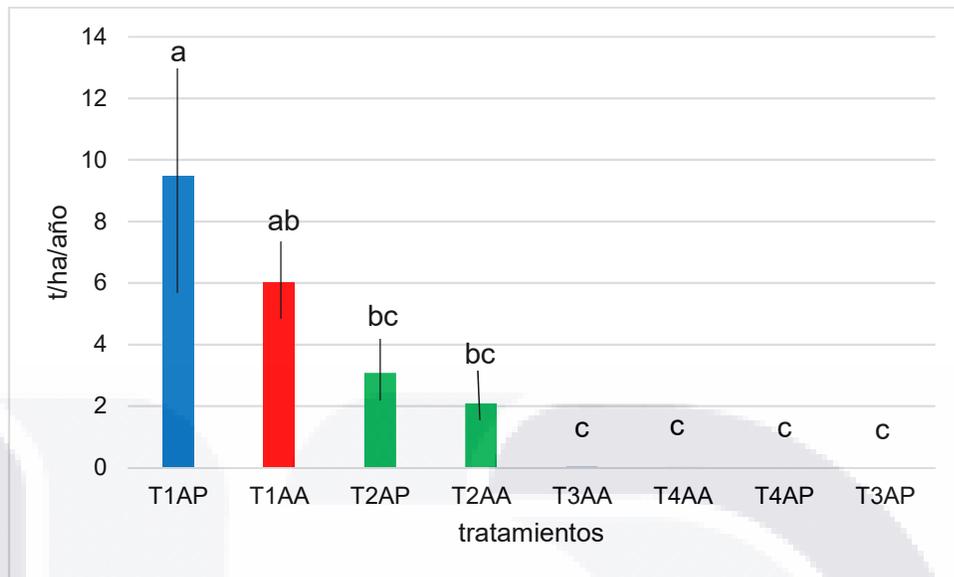


Figura 20. Cantidad de suelo perdido en cada tratamiento de las Unidades Experimentales 1 (AP) y 2 (AA) en el año 2018.

Realizada con la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$), tratamientos con la misma letra son estadísticamente iguales.

7.3 Determinación del factor de erosividad de la lluvia R

En esta parte de los resultados se muestra la variación del índice de erosividad de la lluvia tanto entre las unidades experimentales como en los años donde se realizaron las mediciones de sedimentos (2017 y 2018). Además de que se calculó este índice por evento de lluvia con lo que se realizaron pluviogramas de cada tratamiento en las dos unidades experimentales y los dos años evaluados. Realizándose además interpolaciones con IDW y Kriging para observar la variación de la lluvia en las unidades experimentales.

7.3.1 Determinación del índice de erosividad de la lluvia

Utilizando la metodología descrita por (Wischmeier 1959), citado por (Becerra 1999), para determinar la erosividad de la lluvia, y con los datos de precipitación de

cada 15 minutos reportado por las estaciones meteorológicas del INIFAP, se obtuvo el siguiente resultado para cada unidad experimental.

Como se muestra en el cuadro 12, la unidad experimental que se presentó el factor de erosividad de la lluvia más elevado, fue la UE 1 con 1,838.8 y 2,785.4 MJ/ha.año para los años 2017 y 2018 respectivamente con precipitaciones de 473.4 mm para el 2017 y de 558.8 mm el año 2018. Mientras que en la UE 2 fue de 1,145.6 y 2,731.5 MJ/ha.año para los años 2017 y 2018 respectivamente, con precipitaciones de 411.5 mm para el 2017 y 582.1 mm el año 2018.

Como se puede observar en el cuadro 12, el volumen de precipitación entre los años 2017 y 2018 tuvo una gran variación con diferencias de 85.4 mm en la UE 1 y de 170.6 mm en la UE 2, lo que significó incrementos en la erosividad de la lluvia de hasta 946.6 MJ/ha.año en la UE 1 y de 1,585.9 MJ/ha.año para la UE 2. Con lo que se puede afirmar que entre mayor sea el volumen de la precipitación a lo largo del año mayor será la erosividad de la lluvia.

Cuadro 12. Factor del índice de erosividad de la lluvia calculado para cada unidad experimental para el año 2017.

Unidad Experimental	Año del muestreo	Precipitación en mm	Factor R en MJ/ha.año
UE 1	2017	473.4	1,838.8
(Área Pecuaria)	2018	558.8	2,785.4
UE 2	2017	411.5	1,145.6
(Área agrícola)	2018	582.1	2,731.5

7.3.2 Índice de erosividad de la lluvia por evento (EI30) y el arrastre de sedimentos en la Unidad Experimental 1 para el año 2017.

En la unidad de suelo del sitio experimental 1 (AP) se muestrearon un total de 27 eventos pluviales en el año 2017. Se presenta de forma gráfica en las figuras 22, 23, 24 y 25 la relación entre la intensidad de lluvia y el arrastre de partículas registradas solo de los eventos en los que se presentó mayor pérdida de

sedimentos. Los días del año mostrados en el gráfico representan las fechas en las que se muestreó los sedimentos arrastrados en cada módulo de escurrimiento después de cada evento pluvial.

El T1 del sitio experimental 1 presentó la mayor cantidad de pérdida de suelo, registrada principalmente en los días 200 (2.419 t/ha), 201 (1.011 t/ha), 202 (1.028 t/ha) y 203 con (1.476 t/ha) con índices de erosividad de la lluvia de 32.2 MJ.mm/ha.hr, 251.6 MJ.mm/ha.hr, 310.7 MJ.mm/ha.hr y 102.7 MJ.mm/ha.hr respectivamente que se presentaron en el mes de julio (Figura 22).

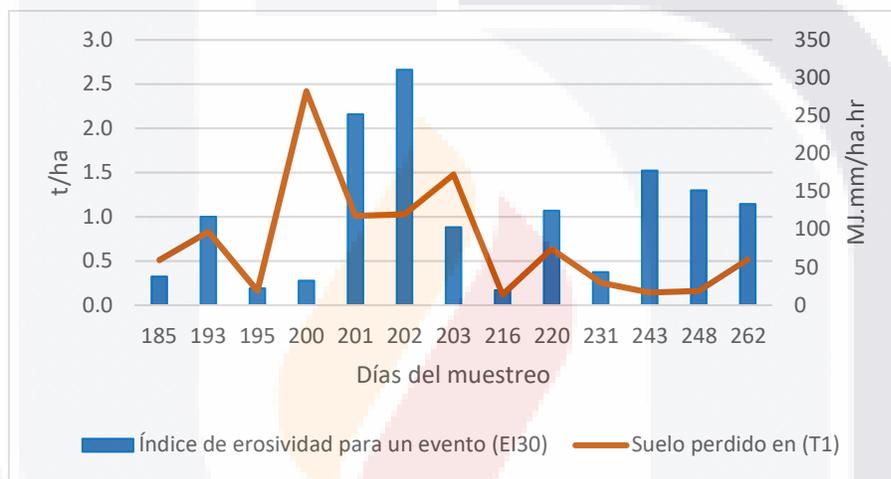


Figura 21. Índice de erosividad por evento de lluvia y generación de sedimentos. Unidad experimental 1. T1: Suelo desnudo.

En el T2 los eventos con mayor cantidad de pérdida de suelo se presentaron en los días 193 (0.232 t/ha), 200 (0.414 t/ha), 201 (0.182 t/ha) y 202 con (0.525 t/ha) con índices de erosividad de la lluvia de 116.5 MJ.mm/ha.hr, 32.2 MJ.mm/ha.hr, 251.6 MJ.mm/ha.hr y 310.7 MJ.mm/ha.hr respectivamente que se presentaron en el mes de julio (Figura 23).

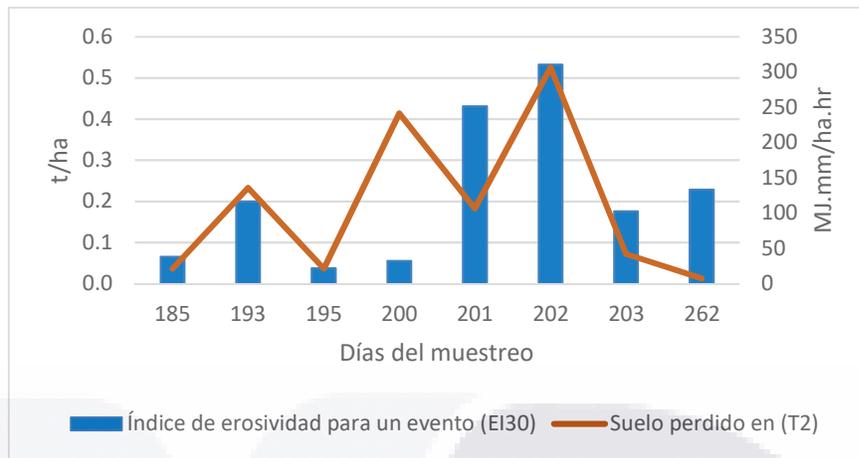


Figura 22. Índice de erosividad por evento de lluvia y generación de sedimentos. Unidad experimental 1. T2: Barbecho.

Respecto al T4 los muestreos en los que se registró mayor cantidad de pérdida de sedimentos fueron en los días 178 (0.0012 t/ha), 203 (0.0020 t/ha) y 216 con (0.0007 t/ha) con índices de erosividad de la lluvia de 17.6 MJ.mm/ha.hr, 102.7 MJ.mm/ha.hr, y 19.7 MJ.mm/ha.hr respectivamente, que se presentaron en los meses de junio y julio (figura 24).

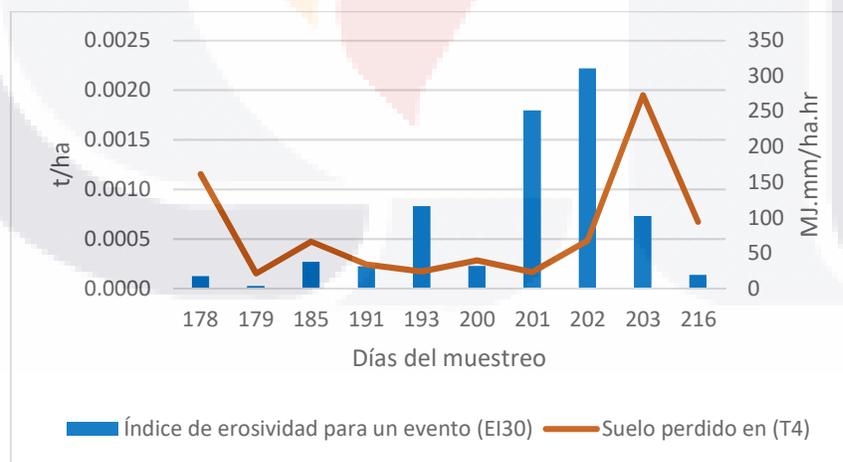


Figura 23. Índice de erosividad por evento de lluvia y generación de sedimentos. Unidad experimental 1. T4: Pastizal inducido.

En el T3 los muestreos en los que se registró mayor cantidad de pérdida fueron en los días 178, 185 y 203 con aproximadamente (0.0006 t/ha) en cada evento e índices

de erosividad de la lluvia de 17.6 MJ.mm/ha.hr, 37.9 MJ.mm/ha.hr y 102.7 MJ.mm/ha.hr respectivamente, presentándose en los meses de junio y julio (Figura 25).

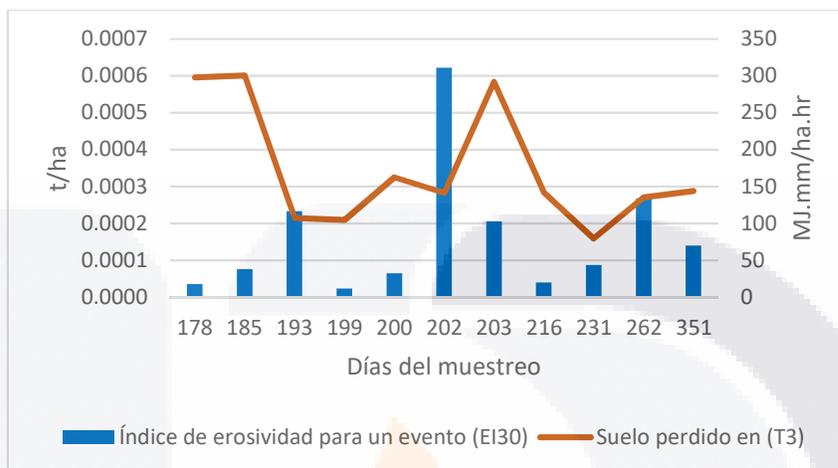


Figura 24. Índice de erosividad por evento de lluvia y generación de sedimentos. Unidad experimental 1. T3: Barbecho con esquilmo.

7.3.3 Índice de erosividad de la lluvia por evento (EI30) y el arrastre de sedimentos en la Unidad Experimental 2 para el año 2017.

En la unidad experimental 2 (AA) se tuvieron un total de 23 eventos pluviales en el año 2017. Se presenta de forma gráfica la relación entre la intensidad de lluvia y el arrastre de partículas registradas, solo de los eventos en los que se presentó mayor pérdida de sedimentos, en las figuras 26, 27, 28 y 29. Los días del año mostrados en el gráfico representan las fechas de toma de muestras de los sedimentos arrastrados en cada módulo de escurrimiento después de cada evento pluvial.

En el T1 se presentaron los eventos en los que se registró mayor pérdida de suelo, en los días 200 (0.768 t/ha), 203 (0.573 t/ha) y 220 (0.905 t/ha), con índices de erosividad de la lluvia de 132.7 MJ.mm/ha.hr, 181.2 MJ.mm/ha.hr y 58.5 MJ.mm/ha.hr respectivamente, que se presentaron en los meses de julio y agosto (Figura 26).

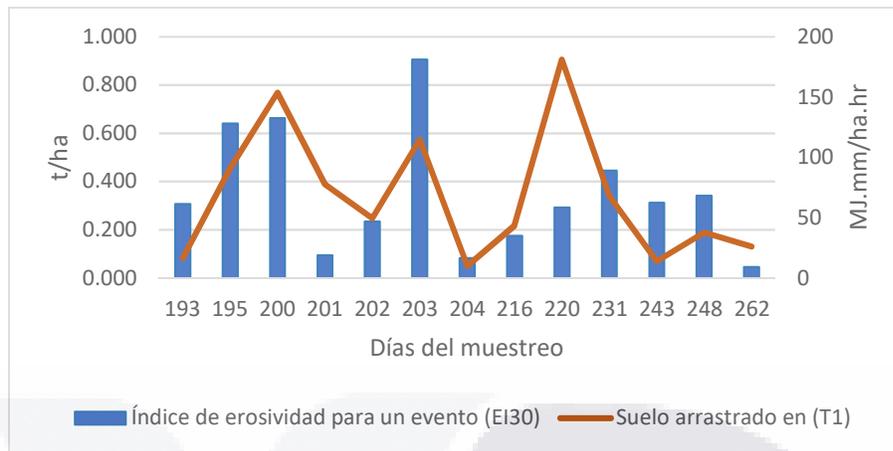


Figura 25. Índice de erosividad por evento de lluvia y generación de sedimentos. Unidad experimental 2. T1: Suelo desnudo.

En el T2, los eventos que presentaron mayor cantidad de pérdida de sedimentos, fueron en los días 201 (0.439 t/ha), 202 (0.338 t/ha), 203 (0.736 t/ha) y 216 (0.201 t/ha), con índices de erosividad de la lluvia de 18.8 MJ.mm/ha.hr, 46.9 MJ.mm/ha.hr, 181.2 MJ.mm/ha.hr y 35.1 MJ.mm/ha.hr respectivamente, que se presentaron en los meses de julio y agosto (Figura 27).



Figura 26. Índice de erosividad por evento de lluvia y generación de sedimentos. Unidad experimental 2. T2: Barbecho.

El T4 presentó los eventos más erosivos en los días 200 (0.129 t/ha), 201 (0.194 t/ha), 202 (0.129 t/ha) y 203 con (0.539 t/ha) con índices de erosividad de la lluvia

de 132.7 MJ.mm/ha.hr, 18.8 MJ.mm/ha.hr, 46.9 MJ.mm/ha.hr, 181.2 MJ.mm/ha.hr respectivamente, presentándose en el mes de julio (Figura 28).

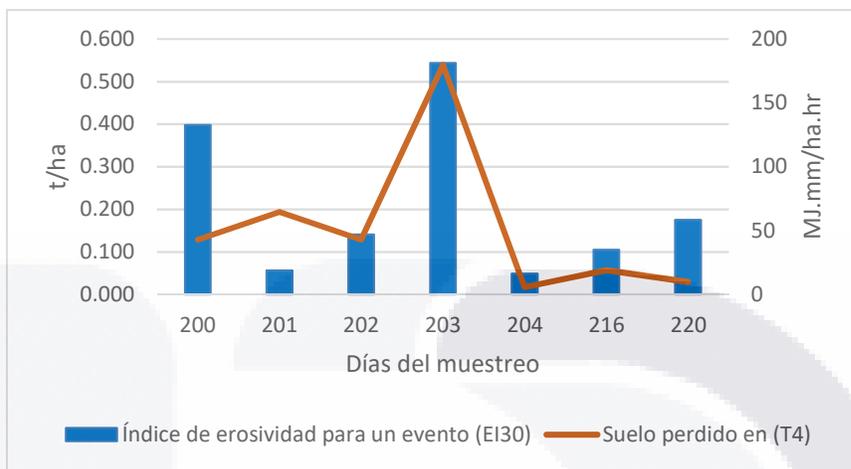


Figura 27. Índice de erosividad por evento de lluvia y generación de sedimentos. Unidad experimental 2. T4: Pastizal inducido.

El T3 fue el tratamiento en el que se presentaron los índices más bajos de erosión en los eventos, siendo sólo en los días 200 (0.203 t/ha), 201 (0.074 t/ha), 202 (0.072 t/ha) y 203 (0.193 t/ha), con índices de erosividad de la lluvia de 132.7 MJ.mm/ha.hr, 18.8 MJ.mm/ha.hr, 46.9 MJ.mm/ha.hr y 181.2 MJ.mm/ha.hr, respectivamente, presentándose en el mes de julio (Figura 29).



Figura 28. Índice de erosividad por evento de lluvia y generación de sedimentos. Unidad experimental 2. T3: Barbecho con esquilmo.

7.3.4 Índice de erosividad de la lluvia por evento (EI30) y el arrastre de sedimentos en la Unidad Experimental 1 para el año 2018.

En la unidad de suelo del sitio experimental 1 (AP) se muestrearon un total de 28 eventos pluviales en el año 2018. Se presenta de forma gráfica la relación entre la intensidad de lluvia y el arrastre de partículas registradas solo de los eventos en los que se presentó mayor pérdida de sedimentos en las figuras 30, 31, 32 y 33. Los días del año mostrados en el gráfico, representan las fechas en las que se muestreó los sedimentos arrastrados en cada módulo de escurrimiento, después de cada evento pluvial.

El T1 del sitio experimental 1 presentó la mayor cantidad de pérdida de suelo, registrada principalmente en los días 163 (1.8499 t/ha), 173 (0.942 t/ha), 241 (1.3312 t/ha), y 279 con (0.8955 t/ha), con índices de erosividad de la lluvia de 368.3 MJ.mm/ha.hr, 353.1 MJ.mm/ha.hr, 238.8 MJ.mm/ha.hr y 469.4 MJ.mm/ha.hr respectivamente, que se presentaron en los meses de junio, agosto y octubre (Figura 30).

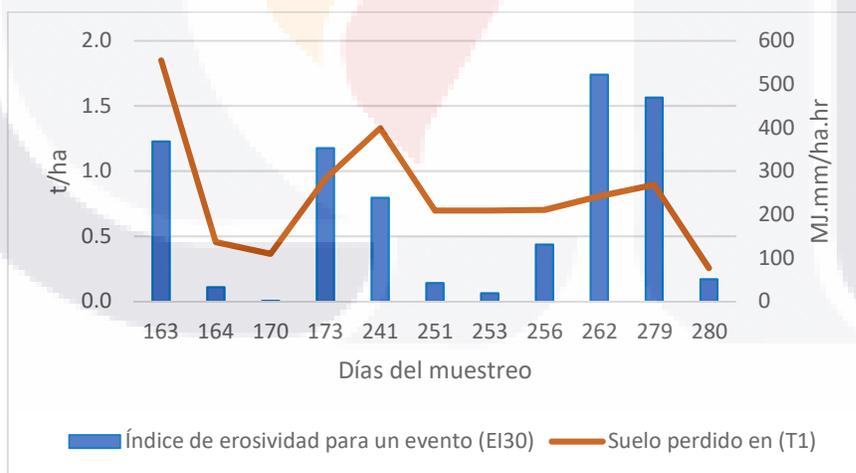


Figura 29. Índice de erosividad por evento de lluvia y generación de sedimentos. Unidad experimental 1. T1: Suelo desnudo.

En el T2, los eventos con mayor cantidad de pérdida de suelo, se presentaron en los días 163 (0.4120 t/ha), 241 (0.5180 t/ha), 279 (0.5448 t/ha) y 297 con (0.286 t/ha) con índices de erosividad de la lluvia de 368.3 MJ.mm/ha.hr, 238.8 MJ.mm/ha.hr, 469.4 MJ.mm/ha.hr y 49.3 MJ.mm/ha.hr respectivamente, que se presentaron en los meses de junio, agosto y octubre (Figura 31).

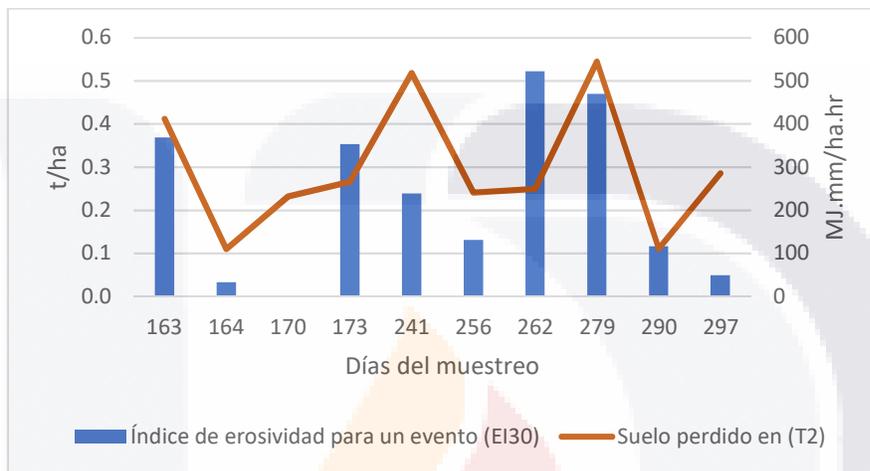


Figura 30. Índice de erosividad por evento de lluvia y generación de sedimentos. Unidad experimental 1. T2: Barbecho.

Respecto al T4, los muestreos en los que se registró mayor cantidad de pérdida de sedimentos fueron en los días 163 (0.0012 t/ha), 180 (0.0013 t/ha) y 241 con (0.0028 t/ha), con índices de erosividad de la lluvia de 368.6 MJ.mm/ha.hr, 67.3 MJ.mm/ha.hr, y 238.8 MJ.mm/ha.hr respectivamente, que se presentaron en los meses de junio y agosto (figura 32).

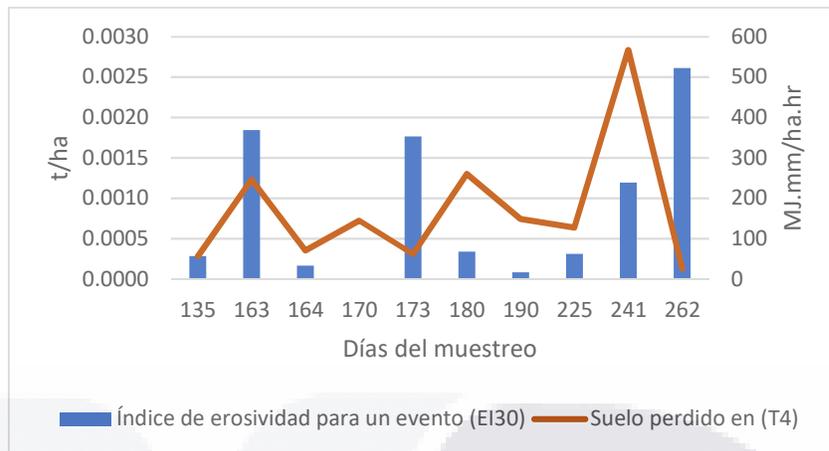


Figura 31. Índice de erosividad por evento de lluvia y generación de sedimentos. Unidad experimental 1. T4: Pastizal Inducido.

En el T3, los muestreos en los que se registró mayor cantidad de pérdida fueron en los días 163 (0.0010 t/ha), 170 (0.0009 t/ha) y 225 con (0.0008 t/ha) con índices de erosividad de la lluvia de 368.3 MJ.mm/ha.hr, 1.4 MJ.mm/ha.hr y 62.5 MJ.mm/ha.hr respectivamente, presentándose en los meses de junio y agosto (Figura 33).

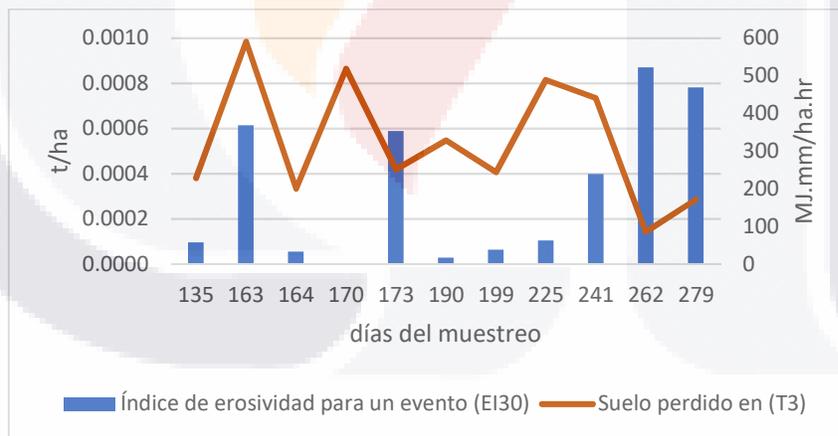


Figura 32. Índice de erosividad por evento de lluvia y generación de sedimentos. Unidad experimental 1. T3: Barbecho con esquilmo.

7.3.5 Índice de erosividad de la lluvia por evento (EI30) y el arrastre de sedimentos en la Unidad Experimental 2, para el año 2018.

En la unidad experimental 2 (AA) se tuvieron un total de 26 eventos pluviales en el año 2018. Se presenta de forma gráfica la relación entre la intensidad de lluvia y el arrastre de partículas registradas, solo de los eventos en los que se presentó mayor pérdida de sedimentos en las figuras 34, 35, 36 y 37. Los días del año mostrados en el gráfico representan las fechas en las que se tomaron las muestras de los sedimentos arrastrados en cada módulo de escurrimiento, después de cada evento pluvial.

En el T1 se presentaron los eventos en los que se registró mayor pérdida de suelo en los días 163 (0.6917 t/ha), 241 (0.5742 t/ha), 253 (1.0930 t/ha) y 279 con (0.7544 t/ha) presentando índices de erosividad de la lluvia de 415.2 MJ.mm/ha.hr, 629.9 MJ.mm/ha.hr, 153.2 MJ.mm/ha.hr y 27.7 MJ.mm/ha.hr, respectivamente, que se presentaron en los meses de junio, agosto y octubre (Figura 34).

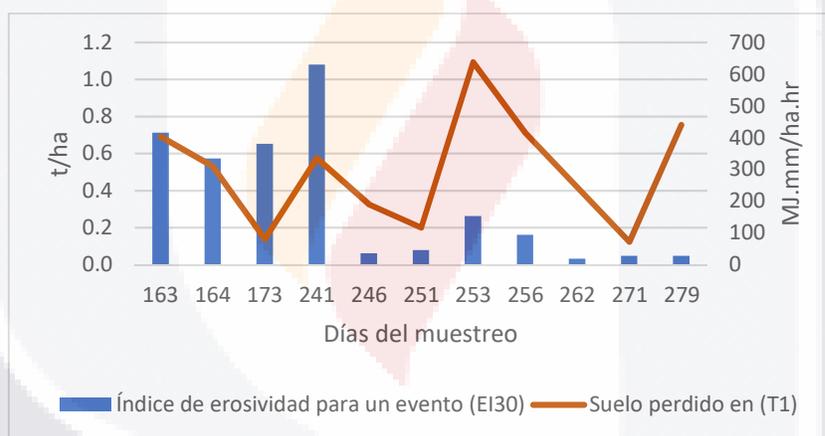


Figura 33. Índice de erosividad por evento de lluvia y generación de sedimentos. Unidad experimental 2. T1: Suelo desnudo.

En el T2, los eventos con mayor cantidad de pérdida de suelo se presentaron en los días 163 (0.257 t/ha), 164 (0.2336 t/ha) y 253 con (0.8039 t/ha), con índices de erosividad de la lluvia de 415.2 MJ.mm/ha.hr, 334.6 MJ.mm/ha.hr y 153.2 MJ.mm/ha.hr, respectivamente, que se presentaron en los meses de junio y septiembre (Figura 35).

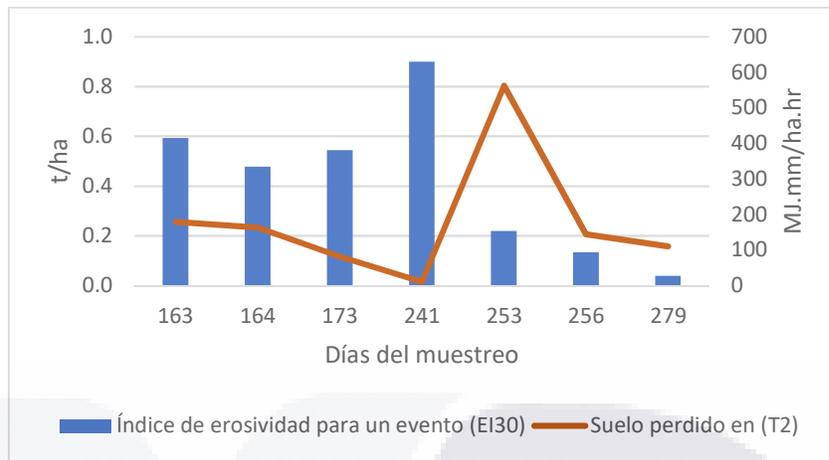


Figura 34. Índice de erosividad por evento de lluvia y generación de sedimentos. Unidad experimental 2. T2: Barbecho.

En el T3 los muestreos en los que se registró mayor cantidad de pérdida fueron en los días 164 (0.0008 t/ha), 256 (0.0018 t/ha) y 297 con (0.0009 t/ha), con índices de erosividad de la lluvia de 334.6 MJ.mm/ha.hr, 93.6 MJ.mm/ha.hr y 140.2 MJ.mm/ha.hr, respectivamente, presentándose en los meses de junio, septiembre y octubre (Figura 36).

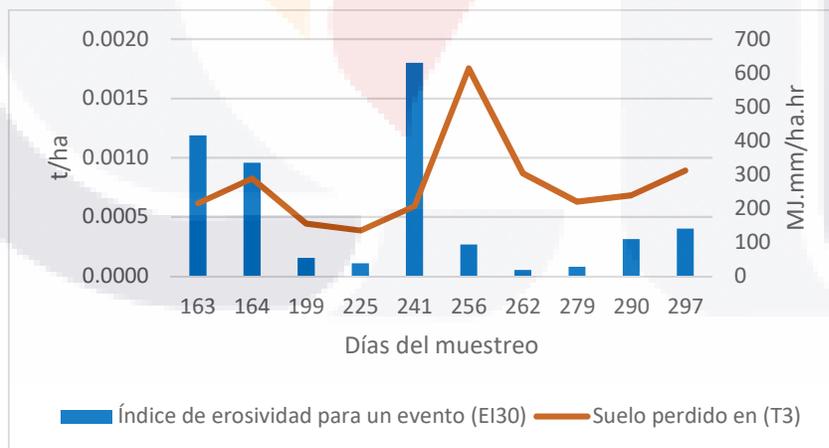


Figura 35. Índice de erosividad por evento de lluvia y generación de sedimentos. Unidad experimental 2. T3: Barbecho con esquilmo.

Respecto al T4 los muestreos en los que se registró mayor cantidad de pérdida de sedimentos, fueron en los días 164 (0.0021 t/ha), 173 (0.0018 t/ha) y 253 con

(0.0057 t/ha), con índices de erosividad de la lluvia de 334.6 MJ.mm/ha.hr, 380.7 MJ.mm/ha.hr, y 153.2 MJ.mm/ha.hr, respectivamente, que se presentaron en los meses de junio y agosto (figura 37).

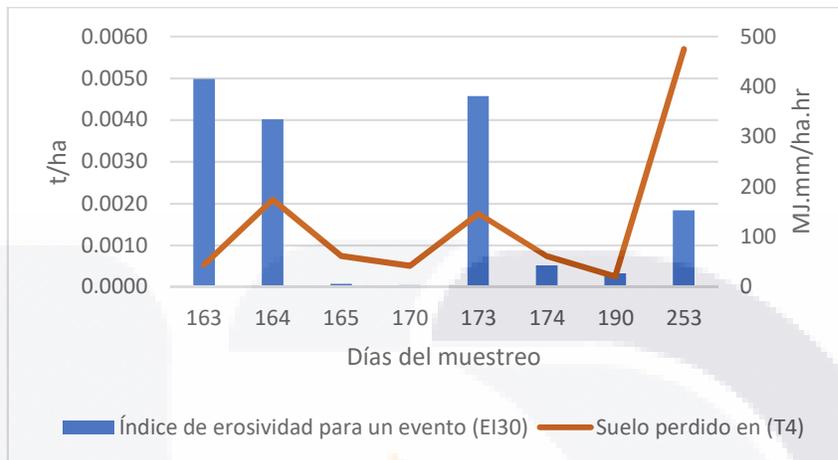


Figura 36. Índice de erosividad por evento de lluvia y generación de sedimentos. Unidad experimental 2. T4: Pastizal Inducido.

7.4 Estimación de la precipitación en cada unidad experimental

Se empleó el software ArcGis 10.4.1 y los datos de las estaciones del INIFAP para estimar la precipitación que se presenta en cada unidad experimental logrando verificar que los tratamientos establecidos en el sitio experimental 1 se encuentran en un área donde la precipitación osciló entre los 408 a 445 mm, mientras que los tratamientos establecidos en la unidad experimental 2 la precipitación fue de 372 a 408 mm para el año 2017 (Figura 38).

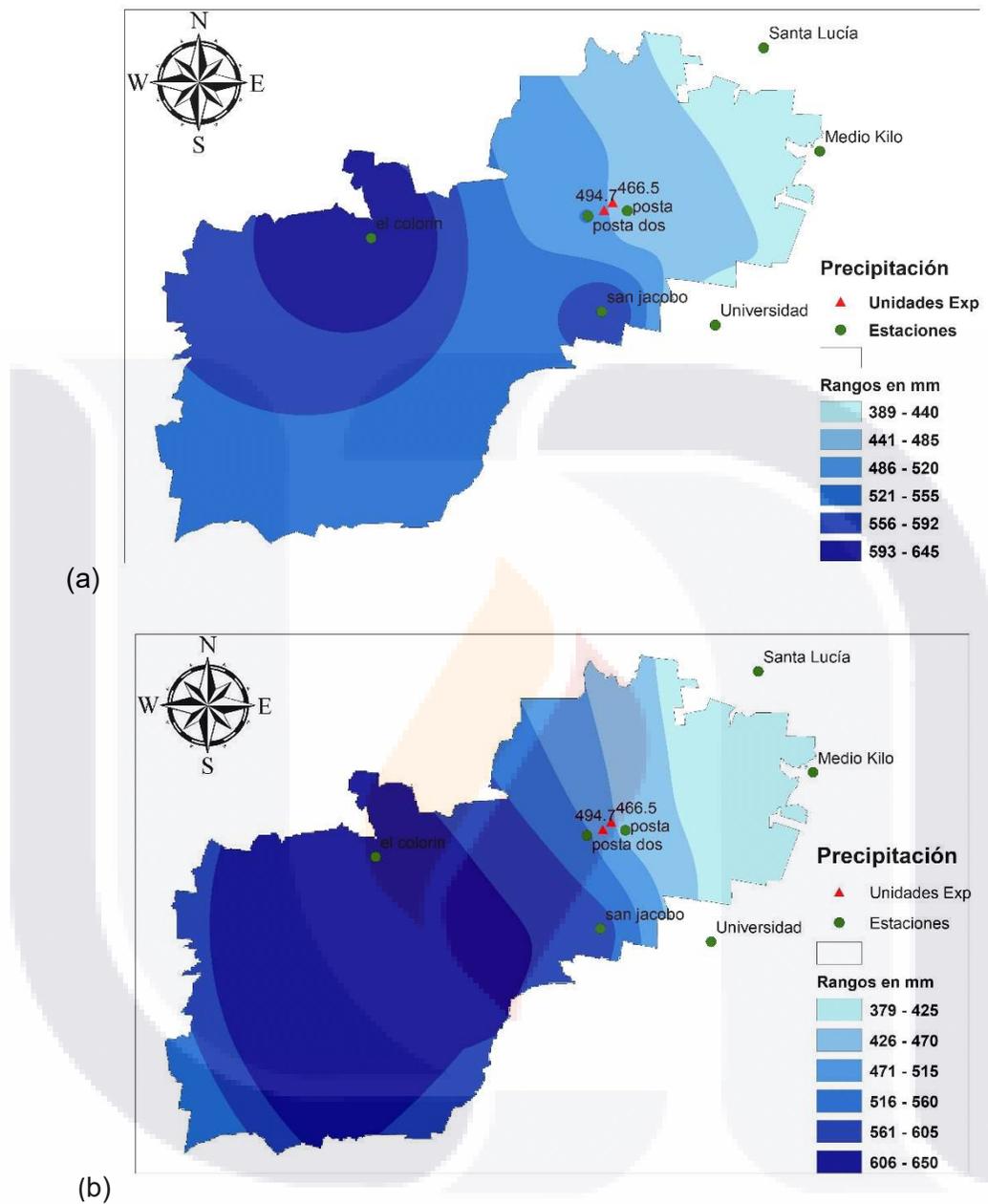


Figura 37. Rangos de precipitación por medio de interpolación con IDW (a) e interpolación con Kriging (b) en el municipio de Jesús María y su influencia en los sitios experimentales con datos de las estaciones meteorológicas INIFAP para el año 2017.

7.5 Relación entre la pérdida de sedimentos y las características de la lluvia

Para poder encontrar la relación que mejor explique el fenómeno de la pérdida de suelo en cada tratamiento y las características de la lluvia que generaron estos escurrimientos, se realizó un análisis de correlación, donde la variable dependiente fue el suelo perdido en cada tratamiento y las variables independientes fueron la intensidad de la lluvia, el volumen de las precipitaciones medido de dos formas: pluviómetros *in situ* y las estaciones meteorológicas del INIFAP y el índice de erosividad para un evento EI_{30} .

En la unidad experimental 1 (AP) para el año 2017, se encontró que en los tratamientos T1 y T2 los valores de R^2 fueron más altos, lo que significa que presentaron la correlación más alta con respecto al EI_{30} , sin embargo, la correlación en general se presenta baja para todos los tratamientos. En tanto que los tratamientos T3 y T4 prácticamente no tuvieron correlación con el EI_{30} . Por otra parte, la correlación que existe entre la precipitación medida por las estaciones meteorológicas y la medida con el pluviómetro *in situ* es muy alta confirmando que la cantidad de lluvia que registraron las estaciones fue muy parecida a la que cayó en las unidades experimentales (Cuadro 13).

Cuadro 13. Correlación entre tratamientos de la Unidad experimental 1 (AP) para el año 2017.

	T1	T2	T3	T4	PP	PEM	Int.	EI_{30}
PP	0.24	0.19	0.02	-0.07	1.00			
PEM	0.21	0.23	-0.02	-0.10	0.93	1.00		
Int.	0.39	0.34	0.32	0.20	-0.05	0.10	1.00	
EI_{30}	0.41	0.57	0.07	0.07	0.52	0.69	0.62	1.00

PP = Precipitación medida por el pluviómetro *in situ*; PEM = Precipitación medida por las estaciones meteorológicas; Int. = Intensidad de la lluvia; EI_{30} = índice de erosividad para un evento; T = tratamiento.

En la unidad experimental 2 (AP) para el año 2017, se encontró que en los tratamientos T1 y T2 los valores de R^2 fueron más altos, lo que significa que tuvieron una mayor correlación con la intensidad de la lluvia que con el EI_{30} . Mientras que los tratamientos T3 y T4 presentaron una mayor correlación con el EI_{30} que con cualquiera de las otras variables. Además de presentarse una alta correlación entre la precipitación medida por las estaciones meteorológicas y la medida con el pluviómetro *in situ*, confirmando que la cantidad de lluvia que registraron las estaciones fue muy parecida a la que cayó en las unidades experimentales (Cuadro 14).

Cuadro 14. Correlación entre tratamientos de la Unidad experimental 2 (AA) para el año 2017.

	T1	T2	T3	T4	PP	PEM	Int.	EI_{30}
PP	0.20	-0.03	0.10	0.03	1.00			
PEM	0.24	-0.05	0.12	0.04	0.94	1.00		
Int.	0.76	0.52	0.58	0.55	-0.03	0.09	1.00	
EI_{30}	0.67	0.49	0.66	0.61	0.50	0.64	0.66	1.00

PP = Precipitación medida por el pluviómetro *in situ*; PEM = Precipitación medida por las estaciones meteorológicas; Int. = Intensidad de la lluvia; EI_{30} = índice de erosividad para un evento.

En la unidad experimental 1 (AP) para el año 2018, se encontró que solo el tratamiento T2 tuvo el valor de R^2 más alto, por lo que fue el tratamiento que presentó mayor correlación respecto a la variable EI_{30} . Mientras que los tratamientos T1, T3 y T4 tuvieron una mayor correlación con el volumen de la precipitación medida *in situ* que con las demás variables. Además de presentarse una correlación aceptable entre la precipitación medida por las estaciones meteorológicas y la medida con el pluviómetro *in situ*, confirmando que la cantidad de lluvia que registraron las estaciones del INIFAP fue parecida a la que cayó en las unidades experimentales (Cuadro 15).

Cuadro 15. Correlación entre tratamientos de la Unidad experimental 1 (AP) para el año 2018.

	T1	T2	T3	T4	PP	PEM	Int.	El₃₀
PP	0.76	0.60	0.64	0.45	1.00			
PEM	0.66	0.59	0.42	0.24	0.78	1.00		
Int.	0.46	0.73	0.11	0.29	0.10	0.28	1.00	
El₃₀	0.74	0.78	0.29	0.26	0.55	0.82	0.64	1

PP = Precipitación medida por el pluviómetro *in situ*; PEM = Precipitación medida por las estaciones meteorológicas; Int. = Intensidad de la lluvia; El₃₀ = índice de erosividad para un evento.

En la unidad experimental 2 (AA) para el año 2018, se encontró que el tratamiento T1 fue el que tuvo el valor de R² más alto, por lo que fue el que presentó mayor correlación con la variable El₃₀, sin embargo, la correlación para esta variable se presenta bajo para todos los tratamientos. Además de presentarse una correlación aceptable entre la precipitación medida por las estaciones meteorológicas y la medida con el pluviómetro *in situ*, confirmando que la cantidad de lluvia que registraron las estaciones del INIFAP, fue parecida a la que cayó en las unidades experimentales (Cuadro 16).

Cuadro 16. Correlación entre tratamientos de la Unidad experimental 2 (AA) para el año 2018.

	T1	T2	T3	T4	PP	PEM	Int.	El₃₀
PP	0.38	0.39	0.21	0.29	1.00			
PEM	0.31	0.26	0.08	0.25	0.82	1.00		
Int.	0.41	0.07	0.08	-0.01	0.03	0.30	1.00	
El₃₀	0.47	0.28	0.11	0.25	0.50	0.78	0.71	1

PP = Precipitación medida por el pluviómetro *in situ*; PEM = Precipitación medida por las estaciones meteorológicas; Int. = Intensidad de la lluvia; El₃₀ = índice de erosividad para un evento.

VIII. Discusión de resultados

Como se puede observar en las figuras 20 y 21, el tratamiento de suelo desnudo (T1) coincidió en ambas unidades experimentales, como el que presenta mayores problemas de erosión, registrando pérdidas de sedimentos de hasta 9.503 y 4.475 t/ha/año para las unidades experimentales 1 (AP) y 2 (AA), respectivamente en el año 2017, mientras que para el año 2018 fue de 9.489 t/ha/año para la UE 1 (AP) y 6.033 t/ha/año para la UE 2 (AA), para este mismo tratamiento que volvió a presentar los valores más altos de erosión, esto coincide con Alarcón (2013), en que la condición de suelo desnudo es la que puede presentar mayor susceptibilidad a ser erosionado.

Le siguió el barbecho (T2) de las UE 2 (AA) y UE 1 (AP) con 1.962 y 1.523 t/ha/año respectivamente, el pastizal inducido (T4) con 1.114 t/ha/año en la UE 2 para el año 2017, mientras que para el 2018 de la misma forma le siguió el (T2) con 3.082 t/ha/año para la UE 1 y 2.086 t/ha/año para la UE 2. Pudiendo deberse la gran pérdida de sedimentos del pastizal natural (T4) en la unidad experimental 2, al recién establecimiento del tratamiento que con la llegada de las primeras lluvias y el lento desarrollo del pasto sembrado, dejaron expuesto al suelo provocando una erosión mucho mayor con respecto al mismo tratamiento ya establecido en la unidad experimental 1.

Mientras que los tratamientos que mostraron menor arrastre de sedimentos fueron el barbecho con esquilmo (T3) y el pastizal inducido (T4) con 0.005 y 0.007 t/ha/año respectivamente para la UE 1, mientras que para la UE 2 fue de 0.656 t/ha/año para T3 en el año 2017. Por otra parte para el año 2018 siguieron siendo los tratamientos T3 y T4 los que presentaron menor pérdida de sedimentos con 0.029 y 0.014 t/ha/año de la UE 2, y de 0.010 t/ha/año para el T4 y 0.008 t/ha/año para el T3 de la UE 1, coincidiendo con Castro (2013), en que la cobertura vegetal es el factor que en mayor medida influye para que no se presente el desprendimiento y arrastre de partículas del suelo por la acción de las gotas de lluvia.

Los tratamientos T3 y T4 presentaron una baja asociación entre la pérdida de suelo y el EI_{30} , a excepción de la UE 2 en el año 2017, este comportamiento pudo haberse presentado debido a que se ha observado que los residuos agregados al suelo disminuyen la velocidad del escurrimiento, y protegen la superficie del suelo del efecto de disgregación, que provocan el impacto de las gotas de lluvia en las partículas del suelo, tal como menciona Tiscareño y col (1999).

Los tratamientos T1 y T2 presentaron la mayor asociación entre la pérdida de suelo y el EI_{30} en la mayoría de los casos, con excepción de los valores que obtuvieron estos tratamientos en la UE 2 para el año 2017, donde la intensidad de la lluvia obtuvo una mayor asociación incluso que el EI_{30} . Estos resultados coinciden con lo que menciona Becerra (1999), en que el EI_{30} es el índice que combina dos de las características de la lluvia tempestuosa, que más relación tienen con la pérdida de suelo.

La erosionabilidad es un proceso muy dinámico, pues varía por la interacción de factores químicos, físicos y mineralógicos en el suelo. Los diversos mecanismos que influyen en la erosión actúan al mismo tiempo y están relacionados con propiedades específicas del suelo (USDA-ARS, 1997), menciona que la valoración de FK , es necesaria para la realización de predicciones de pérdida de suelo, además de que lleva a la comprensión de los procesos y mecanismos de la erosión que describen la resistencia del suelo al impacto de las gotas de lluvia, debido a las propiedades intrínsecas del mismo suelo.

Las variaciones que se muestran en los (cuadros 11 y 12) entre FK_{ws} y FK_{γ} son razonables, teniendo en cuenta los gradientes presentados para las variables que definen la erosionabilidad edáfica, sobre todo cuando se consideran muchos otros factores y propiedades que influyen en estimación de la erosionabilidad, así como la incompleta base de datos de estudios realizados anteriormente (Wang y col., 2014). Con base en esto, sería cuestionable el uso, al menos para Phaeozems, de valores FK basados solamente en la textura y M.O. como sucede en el FK_T ya que podría minimizarse en gran medida las estimaciones de la erosión; como por

ejemplo Montes-León y col. (2011) donde elaboraron el mapa de erosión potencial a nivel nacional empleando valores FK en suelos Phaeozems solo en función de la textura (gruesa = 0.013; media = 0.02 y fina = 0.007 t h MJ mm), los cuales están muy subestimados de acuerdo con lo reportado en el presente estudio.

IX. Conclusiones

Se calculó el factor K de la USLE con el método de referencia de la FAO con dos ecuaciones de regresión, y se asociaron sus resultados con las tasas de sedimentación de las parcelas de escurrimiento, sin mostrar relación aparente.

Se compararon las tasas de erosión del suelo determinadas por el factor K calibrado de la USLE con las tasas de erosión obtenidas de las parcelas de escurrimiento en los diferentes tratamientos, encontrando una sobreestimación de las tasas de erosión de las ecuaciones de regresión en comparación a las obtenidas en las parcelas de escurrimiento.

Bibliografía

Becerra, M. A. 1999. Erosión del suelo. México: Universidad Autónoma Chapingo, Departamento de Suelos.

Conabio, Imae, & Uaa. (2010). Estrategia Para La Conservación Y Uso Sustentable De La Biodiversidad Del Estado De Aguascalientes. Retrieved from http://www.biodiversidad.gob.mx/region/EEB/pdf/ECUSBEA_web.pdf

CONAFOR-UACH (Comisión Nacional Forestal y Universidad Autónoma Chapingo). 2013. Línea base nacional de degradación de tierras y desertificación. Informe final. Comisión Nacional Forestal y Universidad Autónoma Chapingo. Zapopan, Jalisco, México.

Cotler A.H. (2003) Características y manejo de suelos en ecosistemas templados de montaña. Instituto Nacional de Ecología, in Sánchez O., E. Vega, E. Peters y O. Monroy-Vilchis Publishers, Conservación de ecosistemas templados de montaña en México. 1 Eds. INE-SEMARNAT, Mexico, 153-161.

Gardi, C., Angelini, M., Barceló, S., Comerma, J., Cruz Gaistardo, C., Encina Rojas, A, Jones, A., Krasilnikov, P., Mendonca Santos Brefin, M.L., Montanarella, L., Muñis Ugarte, O., Schad, P., Vara Rodríguez, M.I., Vargas, R. (eds). (2014). Atlas de suelos de América Latina y el Caribe. Luxemburgo: Comisión Europea - Oficina de Publicaciones de la Unión Europea.

Garrido A, Cotler H (2010) Degradación de suelos en las cuencas hidrográficas de México. In Cotler H, et al, Las Cuencas Hidrográficas de México. 1 Eds., Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales: 104-107.

González, M. A. B., Pellat, F. P., Gaistardo, C. O. C., Espinoza, J. A. A., Benítez, V. M. R., & Julio, C. (2016). Mapa de erosión de los suelos de México y posibles implicaciones en el almacenamiento de carbono orgánico del suelo. Revista Terra Latinoamericana, 34 (3), 271-288.

INAFED. Instituto Nacional para el Federalismo y Desarrollo Municipal. 2010. Enciclopedia de Los Municipios y Delegaciones de México: Estado de Aguascalientes. Tomado de: <http://siglo.inafed.gob.mx/enciclopedia/> consultado el: 29/03/17

INEGI. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. 2010. Compendio de información geográfica municipal: Jesús María, Aguascalientes. Tomado de: <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/topografia/compendio.aspx>. Consultado por última vez el: 29/03/17

INEGI. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. 2015. Tomado de: <http://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/ags/poblacion/?fbclid=IwAR3BuzaBeYYrB8BhIUlr7JJfrxcllmIJFSdFULEm2kFsirfJJqKSjiYv-Oc>

Kirkby, M. J. and Morgan, R. P. C. editors. (1980). Soil erosion, Chichester: John Wiley. Xiv + 316

Lal, R., Safriel, U., & Boer, B. (2012). Zero Net Land Degradation: A New Sustainable Development Goal for Rio+ 20, (May), 30p.

Lal R (2001) Soil degradation by erosion. Land Degrad Dev 12: 519-539.

López, Santos, A., Conzález, Cervantes, G., Cadena, Zapata, M., González, Barrios, J. L. (2012). Efecto de la labranza primaria en la calidad física del suelo, evaluada mediante permémetro de disco. Tecnología y Ciencias del Agua, pp. 127-141.

López, Santos, A. (2016). Neutralizar La Degradación De Las Tierras , Una Aspiración global. ¿Es posible lograrlo en México? Terra Latinoamericana, 34, 239–249.

Mazllom, U., Emami, H., & Haghnia, G. H. (2016). Prediction the soil erodibility and sediments load using soil attributes, 5(3), 201–208.

Montes-León, M. A. L., Uribe-Alcántara, E. M., & García-Celis, E. (2011). Mapa nacional de erosión potencial. *Tecnología Y Ciencias Del Agua*, 2(1), 5–17.

Nkonya, E., Gerber, N., Baumgarter, P., Von Braun, J., De Pinto, A., Graw, V., Kato, E., Kloos, J., Water, T. (2011). *The economics of Desertification, Land Degradation, and Drought Towards an Integrated Global Assessment*. Bonn. Retrieved from http://www.unccd.int/Lists/SiteDocumentLibrary/Publications/EDLDD/zef_dp_150.pdf

Organización de las Naciones Unidas para la alimentación y la Agricultura (FAO), 2015, Los suelos están en peligro, pero la degradación puede revertirse. Tomado de: <http://www.fao.org/news/story/es/item/357165/icode/> Consultado por última vez: 18/03/2017

Osman K.T. (2013) *Concepts of Soil*. In: *Soils*. Springer, Dordrecht.

Sánchez, H. R.; Mendoza, P. J. de D.; De la Cruz, R. J. C.; Mendoza, M. J. E. y Ramos, R. R. (2013). “Mapa de erosión potencial en la cuenca hidrológica Grijalva-Usumacinta México mediante el uso de SIG”. *Universidad y ciencia*, vol. 29, no. 2, pp. 153-161, ISSN 0186-2979.

Stavi, I., & Lal, R. (2015). Achieving Zero Net Land Degradation: Challenges and opportunities. *Journal of Arid Environments*, 112(PA), 44–51. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2014.01.016>.

Semarnat. Informe de la Situación del Medio Ambiente en México. Compendio de Estadísticas Ambientales. Indicadores Clave y de Desempeño Ambiental. Edición 2012. México. 2013. Tomado de : http://apps1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe_12/pdf/Informe_2012.pdf consultado por última vez: 19/03/2017.

SEMARNAT-INECC (2012) *Quinta Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. 1 Eds., Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales & Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático: 441.

SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). 2011. Estrategia nacional de manejo sustentable de tierras. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. ISBN: 978-607-7908-42-5. México, D. F.

Tiscareño, L.M., A.D. Báez y M.A. Velásquez V., K. N. Potter, J.J. Stone, M. Tapia V., and R. Claverán A. 1999. Agricultural research for watershed restoration in central México. *J. Soil & Water Cons.* 54: 686 – 692.

Renard, K. G., D. C. Yoder, D. T. Lightle & S. M. Dabney. 2011. Universal Soil Loss Equation and Revised Universal Soil Loss Equation. In *Handbook of Erosion Modelling*, ed. R. P. C. M. a. M. A. Nearing., 137-167. Blackwell Publishing Ltd. .

UNCCD. (2013). 2da Conferencia Científica de la CLD; Aspectos económicos de la desertificación, la degradación de las tierras y la sequía: Metodologías y análisis para la toma de decisiones. Recuperado el: 24/10/2017 de: <http://2sc.unccd.int/es/inicio>. ISBN: 978-92-95043-65-7.

USDA. 1999. Guía para la evaluación de la calidad y salud del suelo. https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/stelprdb1044786.pdf

USDA-ARS. 1997. Predicting Soil Erosion by Water : A Guide to Conservation Planning With the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). *Agricultural Handbook 730*. Edited by and D.C. Yoder Renard, K.G., G.R. Foster, G.A. Weesies, D.K. McCool. First ed. USDA-ARS.

Smith A. and Chis E. Mullins 1991. *Soil Analysis, Physical Methods*, Marcel Dekker, Inc. New York.

Wischmeier, W. H., & Smith, D. D. (1978). Predicting rainfall erosion losses. *Agriculture Handbook No. 537, (537), 285–291.* <https://doi.org/10.1029/TR039i002p00285>

Van Breemen, N. & P. Buurman. 2003. Why soil Genesis? In *Soil Formation*. Springer, Dordrecht.

Verbist, B.; Poesen, J.; van Noordwijk, M.; Widiyanto; Suprayogo, D.; Agus, F. y Deckers, J. (2010). "Factors affecting soil loss at plot scale and sediment yield at catchment scale in a tropical volcanic agroforestry landscape". CATENA, vol. 80, no. 1. pp. 34-46, ISSN 0341-8162, DOI 10.1016/j.catena.2009.

Vich, A. I. y Mariani, A. (2010). "Evaluación y predicción de la erosión hídrica en regiones áridas de relieve acentuado del centro-oeste de Argentina". Multequina, vol. 19. No. 1. ISSN 0327-9375.

Wang, Bing, Su Yan Pan, Ruo Yu Ke, Ke Wang, and Yi Ming Wei. 2014. "An Overview of Climate Change Vulnerability: A Bibliometric Analysis Based on Web of Science Database." Natural Hazards 74 (3): 1649–66. <https://doi.org/10.1007/s11069-014-1260-y>.

WRB, I. W. G. 2015. Base referencial mundial del recurso suelo 2014, actualización 2015.: FAO.

Wischmeier, W. H., & Smith, & D. D. (1978) Predicting rainfall erosion losses. 537, 285–291.

Zertuche, V., Badii, M. H., Guillen, A., & Zepeda, M. S. A. (2015). Causas e Impactos Socio-Económico y Ambientales de la Erosión Causes and Socio-Economic and Environmental Impacts of Erosion. Good Conscience, 10(1), 76–87.