UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

UNIDAD REGIONAL UNIVERSITARIA DE ZONAS ÁRIDAS

POSGRADO EN RECURSOS NATURALES Y MEDIO AMBIENTE EN ZONAS ÁRIDAS

EVALUACIÓN DE LA EROSIÓN HÍDRICA MEDIANTE DIFERENTES TÉCNICAS DE MEDICIÓN EN DOS CONDICIONES DE MANEJO EN EL CENTRO DE MÉXICO

TESIS

Que como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN RECURSOS NATURALES Y MEDIO AMBIENTE EN ZONAS ÁRIDAS

PRESENTA:

JOSÉ MANUEL GARCÍA VARGAS

BAJO LA DIRECCIÓN DE:

Dr. ARMANDO LÓPEZ SANTOS

CO-DIRECTOR:

Dr. ANTONIO DE JESÚS MERAZ JIMÉNEZ

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO 1854 COORDINACIÓN GENERAL DE ESTUDIOS DE POSGRADO

APROBADA

Bermejillo, Durango, México Junio, 2021

ZONAS ÁRIDAS

La presente tesis de maestría titulada **Evaluación de la erosión hídrica mediante diferentes técnicas de medición en dos condiciones de manejo en el centro de México** fue realizada por **José Manuel García Vargas** bajo la dirección del Dr. Armando López Santos y la co-dirección del Dr. Antonio de Jesús Meraz Jiménez ha sido revisada y aprobada por el Comité Asesor como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN RECURSOS NATURALES Y MEDIO AMBIENTE EN ZONAS ÁRIDAS

DIRECTOR

Dr. Armando López Santos

CO-DIRECTOR

Dr. Antonio de Jesús Meraz Jiménez

ASESOR:

M.C. Jorge Alejandro Torres Gonzales

ASESOR:

M.C. María del Rosario Jacobo Salcedo

RECONOCIMIENTOS

Se expresa un reconocimiento al apoyo y sustento otorgado para el desarrollo y término de la presente investigación y de mis estudios de posgrado:

Al ***Programa de Becas Nacionales de CONACyT 2019-2020*.**

Al ***Programa de Maestría en Ciencias en Recursos Naturales y Medio Ambiente en Zonas Áridas 2019-2020***, de la Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas, Universidad Autónoma Chapingo.

A la Dirección General de Investigación y Posgrado de la Universidad Autónoma Chapingo.

AGRADECIMIENTOS

A la Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas de la Universidad Autónoma Chapingo, por todos los apoyos que nos brinda y permitirme seguir con mi formación académica.

A mis asesores Dr. Armando López que me brindó todo el apoyo, orientación y tiempo que me dedicó durante todo el proceso para llevar a cabo el trabajo, M.C. Alejandro por apoyarme siempre en el manejo de programas y desarrollo general de la tesis, además me facilitó lo necesario para realizar el trabajo de campo en la Universidad de Aguascalientes, Dr. Antonio Meraz por el apoyo durante el tiempo que estuve en Aguascalientes Y M.C. María del Rosario Jacobo por el tiempo brindado para el desarrollo de la tesis.

A mis compañeros; Raymundo Trujillo, Alejandro Cruz, Isaac Gramillo, Adela Mendoza, Selene Guevara, quienes siempre me apoyaron durante toda maestría.

A Fernando Rufino por compartirme su experiencia en el trabajo realizado y a las personas que me apoyaron en el trabajo de campo Juan y Don Chuy.

DEDICATORIAS

Primeramente, a dios por haberme permitido llegar hasta aquí y darme los elementos para poder concluir con la maestría.

A mis papás José Manuel García y Graciela Vargas por brindarme en todo momento su apoyo y darme la confianza de poder seguir superándome en el ámbito profesional y personal.

A mis hermanos Manuel, Yaz, Yuri, Rocío, Rene, Lupita, Miguel, Karen y Katia por estar ahí dándome la mano cada que necesito de ellos y motivarme a seguir adelante.

A mi novia Alejandra Mejía quien siempre me apoyó en todo lo que necesité y que me motivo a seguir adelante y a no rendirme.

DATOS BIOGRÁFICOS

El presente trabajo fue realizado por el **Ing. José Manuel García Vargas**, la cual obtuvo el grado de Ingeniero en Sistemas Agrícolas en el año 2017 por la Universidad Autónoma Chapingo (UACh), Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas (URUZA), ubicada en Bermejillo, Durango, México. Obtuvo el grado de Ingeniero con la tesis titulada "Evaluación de riego superficial en la Región Lagunera de Durango" en diciembre del 2017, misma que fue dirigida por el M.C. Gabriel García Herrera.

Después de egresar de la licenciatura, trabajó como capturista en el Instituto Nacional Electoral en Gómez Palacio, Durango, y en riego inteligente LandScaping en Torreón, Coahuila. Posteriormente, empezó los estudios de maestría en el Programa de Posgrado en Recursos Naturales y Medio Ambiente en Zonas Áridas en URUZA-UACh, generación 2019-2020.

Contenido

ÍNDICE DE CONTENIDO..……vii

INDICE DE CUADROS.……...ix

INDICE DE FIGURAS ……....ix

RESUMEN ……..……..xiv

ABSTRACT ……..……..xv

1. INTRODUCCCIÓN 1

2. OBJETIVO GENERAL 4

2.1 Objetivos específicos 4

3. HIPÓTESIS 4

4. REVISIÓN DE LITERATURA 5

4.1 Suelo 5

4.2 Erodabilidad 5

4.3 Características edáficas asociadas a la erodabilidad 6

4.3.1 Plasticidad 6

4.3.2 Pegajosidad 6

4.3.3 Cohesión 6

4.4 Propiedades físicas del suelo relacionadas con su erodabilidad 6

4.4.1 Textura 7

4.4.2 Estructura 7

4.5 Propiedades erodibles del suelo 8

4.5.1 Humedad del suelo 8

4.5.2 Capacidad de campo (CC) 8

4.5.3 Punto de marchitez permanente (PMP) 9

El PMP S 9

4.5.4 Capacidad disponible de agua o humedad disponible (HD) 9

4.5.5 Saturación 10

4.5.6 Porosidad del suelo 10

4.6 Propiedades químicas 11
4.6.1 Intercambio iónico en suelos 11
4.6.2 Capacidad de intercambio catiónico (CIC) 12
4.6.3 pH del suelo 12
4.6.4 Conductividad eléctrica 12
4.6.5 Nutrientes del suelo 13
4.7 Biología del suelo 13
4.7.1 Física relacionada con la biología del suelo 14
4.7.2 Química relacionada con la biología del suelo 14
4.8 Definición de erosión 14
4.8.1 Erosión apreciable 15
4.8.2 Erosión no apreciable 15
4.9 Tipos de erosión 16
4.9.1 Erosión hídrica 16
4.9.2 Erosión eólica 16
4.10 Microrrelieve 16
4.11 Métodos de medición 17
4.11.1 Ecuación universal de la pérdida de suelo (USLE por sus siglas en ingles) 18
4.11.2 Parcelas de sedimentación 18
4.11.3 Método de clavos y rondanas 18
4.11.4 Método del perfilómetro de varillas 18
5. MATERIALES Y METODOS 20
5.1 Parcelas de sedimentación 21
5.1.1 Toma de muestras para la cuantificación de sedimentos 22
5.2 Uso del modelo USLE 25
5.3 Medición del Microrelieve 27
6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN 30
6.1 Parcelas de sedimentación 30

6.2 Modelo USLE 47
6.3 Método del perfilómetro 50
7. CONCLUSIONES 78
8. LITERATURA CITADA 79

Índice de cuadros

CUADRO 1. DIMENSIONES EN MM DE LOS MINERALES PRIMARIOS ARENA, LIMO Y ARCILLA DEFINIDOS EN DOS SISTEMAS DE CLASIFICACIÓN 7
CUADRO 2. HUMEDAD APROVECHABLE 10
CUADRO 3. TASA DE EROSIÓN OBTENIDA EN LOS TRATAMIENTOS EVALUADOS EN LAS DOS UNIDADES EXPERIMENTALES. 38
CUADRO 4. TASA DE EROSIÓN OBTENIDA EN LOS TRATAMIENTOS EVALUADOS EN LAS DOS UNIDADES EXPERIMENTALES. 47
CUADRO 5. TASA DE EROSIÓN OBTENIDA MEDIANTE EL MODELO USLE EN LAS DOS UNIDADES EXPERIMENTALES. 49
CUADRO 6. TASA DE EROSIÓN OBTENIDA EN LOS TRATAMIENTOS EVALUADOS EN LAS DOS UNIDADES EXPERIMENTALES CON EL MÉTODO DEL PERFILÓMETRO (M1 VS M2). 51
CUADRO 7. TASA DE EROSIÓN OBTENIDA EN LOS TRATAMIENTOS EVALUADOS EN LAS DOS UNIDADES EXPERIMENTALES CON EL MÉTODO DEL PERFILÓMETRO (M2 VS M3). 52
CUADRO 8. RESULTADOS OBTENIDOS EN LOS TRES MÉTODOS DE MEDICIÓN DE EROSIÓN. 77

índice de figuras

FIGURA 1. UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO 20
FIGURA 2. TRATAMIENTOS: SUELO DESNUDO (A), BARBECHO (B), BARBECHO CON 22
FIGURA 3. TOMA DE MUESTRAS DE AGUA CON SEDIMENTOS. 23
FIGURA 4. A: PESADO DEL PAPEL FILTRO, B: FILTRADO DE MUESTRAS, C: SECADO DE MUESTRAS, D: PESADO DE MUESTRAS 24

FIGURA 5. MEDICIÓN DEL MICRORRELIEVE 28
FIGURA 6. PÉRDIDA DE SUELO POR EVENTO DE LLUVIA EN EL T1 DE LA UE1 (ÁREA PECUARIA). 30
FIGURA 7. PÉRDIDA DE SUELO POR EVENTO DE LLUVIA EN EL T2 DE LA UNIDAD EXPERIMENTAL 1 31
FIGURA 8. PÉRDIDA DE SUELO POR EVENTO DE LLUVIA EN EL T3 DE LA UNIDAD EXPERIMENTAL 1 32
FIGURA 9. PÉRDIDA DE SUELO POR EVENTO DE LLUVIA EN EL T4 DE LA UNIDAD EXPERIMENTAL 1 33
FIGURA 10. PÉRDIDA DE SUELO POR EVENTO DE LLUVIA EN EL T1 DE LA UNIDAD EXPERIMENTAL 2 34
FIGURA 11. PÉRDIDA DE SUELO POR EVENTO DE LLUVIA EN EL T2 DE LA UNIDAD EXPERIMENTAL 2 35
FIGURA 12. PÉRDIDA DE SUELO POR EVENTO DE LLUVIA EN EL T3 DE LA UNIDAD EXPERIMENTAL 2 36
FIGURA 13. PÉRDIDA DE SUELO POR EVENTO DE LLUVIA EN EL T4 DE LA UNIDAD EXPERIMENTAL 2 37
FIGURA 14. PÉRDIDA DE SUELO EN CADA TRATAMIENTO DE LAS DOS UNIDADES EXPERIMENTALES 38
FIGURA 15. PÉRDIDA DE SUELO POR EVENTO DE LLUVIA EN EL T1 DEL ÁREA PECUARIA. 40
FIGURA 16. PÉRDIDA DE SUELO POR EVENTO DE LLUVIA EN EL T2 DEL ÁREA PECUARIA. 40
FIGURA 17. PÉRDIDA DE SUELO POR EVENTO DE LLUVIA EN EL T3 DEL ÁREA PECUARIA. 41
FIGURA 18. PÉRDIDA DE SUELO POR EVENTO DE LLUVIA EN EL T4 DEL ÁREA PECUARIA. 41
FIGURA 19. PÉRDIDA DE SUELO POR EVENTO DE LLUVIA EN EL T1 DEL ÁREA AGRÍCOLA. 42
FIGURA 20. PÉRDIDA DE SUELO POR EVENTO DE LLUVIA EN EL T2 DEL ÁREA AGRÍCOLA. 43
FIGURA 21. PÉRDIDA DE SUELO POR EVENTO DE LLUVIA EN EL T3 DEL ÁREA AGRÍCOLA. 43
FIGURA 22. PÉRDIDA DE SUELO POR EVENTO DE LLUVIA EN EL T4 DEL ÁREA AGRÍCOLA. 44
FIGURA 23. PÉRDIDA DE SUELO POR TRATAMIENTO DEL ÁREA EXPERIMENTAL PECUARIA 45

FIGURA 24. PÉRDIDA DE SUELO POR TRATAMIENTO DEL ÁREA EXPERIMENTAL AGRÍCOLA. 46
FIGURA 25. TASA DE EROSIÓN POR TRATAMIENTO OBTENIDA EN EL ÁREA AGRÍCOLA... 47
FIGURA 26. TASA DE EROSIÓN POR TRATAMIENTO OBTENIDA EN EL ÁREA PECUARIA... 48
FIGURA 27. TASA DE EROSIÓN POR TRATAMIENTO OBTENIDA EN EL ÁREA PECUARIA... 50
FIGURA 28. TASA DE EROSIÓN OBTENIDA EN EL ÁREA PECUARIA. 51
FIGURA 29. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DEL MICRO RELIEVE EN EL TRATAMIENTO BARBECHO DEL ÁREA AGRÍCOLA EN EL MOMENTO 1 (M1). 49
FIGURA 30. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DEL MICRO RELIEVE EN EL TRATAMIENTO BARBECHO DEL ÁREA AGRÍCOLA EN EL MOMENTO 2 (M2). 50
FIGURA 31. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DEL MICRO RELIEVE EN EL TRATAMIENTO BARBECHO DEL ÁREA AGRÍCOLA EN EL MOMENTO 3 (M3). 51
FIGURA 32. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DEL MICRO RELIEVE EN EL TRATAMIENTO SUELO DESNUDO DEL ÁREA AGRÍCOLA EN EL MOMENTO 1 (M1). 53
FIGURA 33. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DEL MICRO RELIEVE EN EL TRATAMIENTO SUELO DESNUDO DEL ÁREA AGRÍCOLA EN EL MOMENTO 2 (M2). 54
FIGURA 34. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DEL MICRO RELIEVE EN EL TRATAMIENTO SUELO DESNUDO DEL ÁREA AGRÍCOLA EN EL MOMENTO 3 (M3). 55
FIGURA 35. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DEL MICRO RELIEVE EN EL TRATAMIENTO BARBECHO DEL ÁREA PECUARIA EN EL MOMENTO 1 (M1)..... 57
FIGURA 36. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DEL MICRO RELIEVE EN EL TRATAMIENTO BARBECHO DEL ÁREA PECUARIA EN EL MOMENTO 2 (M2)..... 58
FIGURA 37. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DEL MICRO RELIEVE EN EL TRATAMIENTO BARBECHO DEL ÁREA PECUARIA EN EL MOMENTO 3 (M3)..... 59
FIGURA 38. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DEL MICRO RELIEVE EN EL TRATAMIENTO SUELO DESNUDO DEL ÁREA PECUARIA EN EL MOMENTO 1 (M1). 61
FIGURA 39. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DEL MICRO RELIEVE EN EL TRATAMIENTO SUELO DESNUDO DEL ÁREA PECUARIA EN EL MOMENTO 2 (M2). 62
FIGURA 40. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DEL MICRO RELIEVE EN EL TRATAMIENTO SUELO DESNUDO DEL ÁREA PECUARIA EN EL MOMENTO 3 (M3). 63
FIGURA 41. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LAS ALTURAS MEDIDAS EN DOS MOMENTOS DE MUESTREO (M1 Y M2) EN EL TRATAMIENTO DE BARBECHO REPETICIÓN 1 EN EL ÁREA AGRÍCOLA. 64
FIGURA 42. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LAS ALTURAS MEDIDAS EN DOS MOMENTOS DE MUESTREO (M1 Y M2) EN EL TRATAMIENTO DE BARBECHO REPETICIÓN 2 EN EL ÁREA AGRÍCOLA. 65

FIGURA 43. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LAS ALTURAS MEDIDAS EN DOS MOMENTOS DE MUESTREO (M1 Y M2) EN EL TRATAMIENTO DE BARBECHO REPETICIÓN 3 EN EL ÁREA AGRÍCOLA. 65
FIGURA 44. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LAS ALTURAS MEDIDAS EN DOS MOMENTOS DE MUESTREO (M1 Y M2) EN EL TRATAMIENTO SUELO DESNUDO REPETICIÓN 1 EN EL ÁREA AGRÍCOLA. 66
FIGURA 45. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LAS ALTURAS MEDIDAS EN DOS MOMENTOS DE MUESTREO (M1 Y M2) EN EL TRATAMIENTO SUELO DESNUDO REPETICIÓN 2 EN EL ÁREA AGRÍCOLA. 66
FIGURA 46. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LAS ALTURAS MEDIDAS EN DOS MOMENTOS DE MUESTREO (M1 Y M2) EN EL TRATAMIENTO SUELO DESNUDO REPETICIÓN 3 EN EL ÁREA AGRÍCOLA. 67
FIGURA 47. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LAS ALTURAS MEDIDAS EN DOS MOMENTOS DE MUESTREO (M2 Y M3) EN EL TRATAMIENTO DE BARBECHO REPETICIÓN 1 EN EL ÁREA AGRÍCOLA. 68
FIGURA 48. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LAS ALTURAS MEDIDAS EN DOS MOMENTOS DE MUESTREO (M2 Y M3) EN EL TRATAMIENTO DE BARBECHO REPETICIÓN 2 EN EL ÁREA AGRÍCOLA. 68
FIGURA 49. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LAS ALTURAS MEDIDAS EN DOS MOMENTOS DE MUESTREO (M2 Y M3) EN EL TRATAMIENTO DE BARBECHO REPETICIÓN 3 EN EL ÁREA AGRÍCOLA. 69
FIGURA 50. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LAS ALTURAS MEDIDAS EN DOS MOMENTOS DE MUESTREO (M2 Y M3) EN EL TRATAMIENTO SUELO DESNUDO REPETICIÓN 1 EN EL ÁREA AGRÍCOLA. 69
FIGURA 51. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LAS ALTURAS MEDIDAS EN DOS MOMENTOS DE MUESTREO (M2 Y M3) EN EL TRATAMIENTO SUELO DESNUDO REPETICIÓN 2 EN EL ÁREA AGRÍCOLA. 70
FIGURA 52. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LAS ALTURAS MEDIDAS EN DOS MOMENTOS DE MUESTREO (M2 Y M3) EN EL TRATAMIENTO SUELO DESNUDO REPETICIÓN 3 EN EL ÁREA AGRÍCOLA. 70
FIGURA 53. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LAS ALTURAS MEDIDAS EN DOS MOMENTOS DE MUESTREO (M1 Y M2) EN EL TRATAMIENTO DE BARBECHO REPETICIÓN 1 EN EL ÁREA PECUARIA. 71
FIGURA 54. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LAS ALTURAS MEDIDAS EN DOS MOMENTOS DE MUESTREO (M1 Y M2) EN EL TRATAMIENTO DE BARBECHO REPETICIÓN 2 EN EL ÁREA PECUARIA. 71

FIGURA 55. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LAS ALTURAS MEDIDAS EN DOS MOMENTOS DE MUESTREO (M1 Y M2) EN EL TRATAMIENTO DE BARBECHO REPETICIÓN 3 EN EL ÁREA PECUARIA. 72
FIGURA 56. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LAS ALTURAS MEDIDAS EN DOS MOMENTOS DE MUESTREO (M1 Y M2) EN EL TRATAMIENTO SUELO DESNUDO REPETICIÓN 1 EN EL ÁREA PECUARIA. 72
FIGURA 57. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LAS ALTURAS MEDIDAS EN DOS MOMENTOS DE MUESTREO (M1 Y M2) EN EL TRATAMIENTO SUELO DESNUDO REPETICIÓN 2 EN EL ÁREA PECUARIA. 73
FIGURA 58. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LAS ALTURAS MEDIDAS EN DOS MOMENTOS DE MUESTREO (M1 Y M2) EN EL TRATAMIENTO SUELO DESNUDO REPETICIÓN 3 EN EL ÁREA PECUARIA. 73
FIGURA 59. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LAS ALTURAS MEDIDAS EN DOS MOMENTOS DE MUESTREO (M2 Y M3) EN EL TRATAMIENTO DE BARBECHO REPETICIÓN 1 EN EL ÁREA PECUARIA. 74
FIGURA 60. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LAS ALTURAS MEDIDAS EN DOS MOMENTOS DE MUESTREO (M2 Y M3) EN EL TRATAMIENTO DE BARBECHO REPETICIÓN 2 EN EL ÁREA PECUARIA. 74
FIGURA 61. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LAS ALTURAS MEDIDAS EN DOS MOMENTOS DE MUESTREO (M2 Y M3) EN EL TRATAMIENTO DE BARBECHO REPETICIÓN 3 EN EL ÁREA PECUARIA. 75
FIGURA 62. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LAS ALTURAS MEDIDAS EN DOS MOMENTOS DE MUESTREO (M2 Y M3) EN EL TRATAMIENTO DE SUELO DESNUDO REPETICIÓN 1 EN EL ÁREA PECUARIA. 75
FIGURA 63. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LAS ALTURAS MEDIDAS EN DOS MOMENTOS DE MUESTREO (M2 Y M3) EN EL TRATAMIENTO DE SUELO DESNUDO REPETICIÓN 2 EN EL ÁREA PECUARIA. 76
FIGURA 64. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LAS ALTURAS MEDIDAS EN DOS MOMENTOS DE MUESTREO (M2 Y M3) EN EL TRATAMIENTO DE SUELO DESNUDO REPETICIÓN 3 EN EL ÁREA PECUARIA. 76

Evaluación de la erosión hídrica mediante diferentes técnicas de medición en dos condiciones de manejo en el centro de México

RESUMEN

Los reportes sobre erosión hídrica (EH), presentan discrepancias debido al uso excesivo de valores por defecto cuando están basados en la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE), por ello las mediciones de campo son fundamentales. Los objetivos de esta investigación fueron: 1) caracterizar el fenómeno de la erosión hídrica en suelos de ladera del centro de México, para explicar procesos erosivos sometidos a diferentes prácticas de manejo y contribuir en la parametrización de modelos de erosión; 2) analizar la influencia de la lluvia en los cambios de rugosidad superficial y su relación con la producción de sedimentos, considerando antecedentes de ciclos anteriores; y 3) comparar las tasas de erosión obtenidas mediante la técnica del perfilómetro de varillas (PV) con medición de sedimentos (MS) y las estimadas mediante la modelación USLE. Se establecieron parcelas de escurrimiento en dos condiciones de uso, agrícola (AA) y pecuario (AP) en terrenos de ladera en el Municipio de Jesús María, Aguascalientes, México; en ambas unidades experimentales se establecieron cuatro tratamientos con tres repeticiones: Suelo desnudo (T1), Suelo barbechado (T2), Suelo barbechado con esquilmos (T3), y Pastizal inducido (T4). Los resultados indican que el modelo USLE sobreestima 10.9 y 25.9 veces más la magnitud de pérdida de suelo comparado con MS y PV con tasas de 2.32 y 0.98 t ha año^{-1}, respectivamente; además, se encontró que PV mostró indicios de recuperación de suelo como consecuencia de la reconfiguración de la rugosidad superficial después de cada ciclo de lluvia, lo cual explica la baja correlación entre las tormentas y la producción de sedimentos.

Palabras clave: Desertificación, erosión hídrica, zonas áridas, suelo

Tesis de Maestría en Ciencias en Recursos Naturales y Medio Ambiente en Zonas Áridas
Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas, Universidad Autónoma Chapingo
Autor: García Vargas José Manuel
Directores de tesis: López Santos Armando & Meraz Jiménez Antonio de Jesús

Evaluation of water erosion using different measurement techniques under two management conditions in central Mexico.

ABSTRACT

Reports on water erosion (EH) present discrepancies due to the excessive use of default values when they are based on the Universal Soil Loss Equation (USLE), therefore field measurements are fundamental. The objectives of this research were: 1) to characterize the phenomenon of water erosion in hillside soils of central Mexico, to explain erosive processes subjected to different management practices and to contribute to the parameterization of erosion models; 2) to analyze the influence of rainfall on changes in surface roughness and its relationship with sediment production, considering previous cycles; and 3) to compare erosion rates obtained by the rod profilometer (PV) technique with sediment measurement (MS) and those estimated by USLE modeling. Runoff plots were established in two conditions of use, agricultural (AA) and livestock (AP) on hillside lands in the Municipality of Jesús María, Aguascalientes, Mexico; four treatments with three replicates were established In both experimental units: bare soil (T1), fallowed soil (T2), fallowed soil with shearings (T3), and induced grassland (T4). The results indicate that the USLE model overestimates 10.9 and 25.9 times more the magnitude of soil loss compared to DM and PV with rates of 2.32 and 0.98 t ha yr^{-1}, respectively; In addition, it was found that PV showed signs of soil recovery as a consequence of reconfiguration of surface roughness after each rain cycle, which explains the low correlation between storms and sediment production.

Keywords: Desertification, water erosion, arid zones, soil

Master of Science Thesis in Natural Resources and Environment in Arid Zones.
Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas, Universidad Autónoma Chapingo
Author: García Vargas José Manuel
Advisors: López Santos Armando & Meraz Jiménez Antonio de Jesús

1. INTRODUCCCIÓN

La erosión hídrica (EH) en la actualidad es considerada como una de las amenazas más importantes a nivel global, debido a los efectos negativos directos en indirectos que produce tanto en sistemas naturales como antrópicos (Borrelli et al., 2017; IPBES, 2018; FAO, 2019). En el Proyecto GLASOD (Global Assessment of Human-Induced Land Degradation) se reporta que la EH inducida o antrópica se observa en distintos grados en una extensión de 1,094 millones de hectáreas (Mha), lo que representa el 55.7% de la superficie total degradada (1,964 *Mha*) (Nkonya et al., 2011).

La EH al producir un desgaste de la capa superior o a través del perfil (subsuperficial) del suelo, en términos generales repercute en la reducción de la productividad y funcionamiento del edafotopo (sustrato-ambiente); la destrucción y redistribución o perdida de componentes edáficos clave, altera funciones que atacan debilitando la capacidad de retención y suministro de nutrientes, humedad, aireación, drenaje, etc., cuyos costos son de preocupación permanentemente (FAO, 2019); por ejemplo, se estima que la tasa anual de pérdida de suelos agrícolas a nivel mundial es de 75 billones de toneladas a un costo de $ 400 billones de dólares americanos (*BUSD*) anual (Borrelli et al., 2017).

En México, la EH es reconocida (Garrido y Cotler, 2010; SEMARNAT, 2011; CONAFOR-UACh, 2013) como uno de los cuatro tipos de degradación edáfica de mayor importancia por cubrir poco más 49.4 ± 23.5 *Mha,* lo que representa el 25.4% del territorio nacional (195.9 *Mha*) (López, 2016). México en su sistema de Cuentas Económica y Ecológicas para los recursos edáficos integra cuatro tipos de afectaciones: 1) erosión hídrica, 2) erosión eólica, 3) degradación química, y 4) degradación física, cuyo costo para 2018 fue 5,986.7 *MUSD*, equivalente al 0.5% PIB, con una variación positiva con respecto al año anterior del 24.7% (INEGI, 2019).

Los estudios de erosión, en años recientes se han multiplicado a nivel mundial (Pandey, Kumar, Zlatic, Nautiyal y Panwar, 2021), y para el caso de México no es la excepción (Garrido y Cotler, 2010; Montes, Uribe y García 2011; SEMARNAT, 2011; CONAFOR-UACh, 2013; Bolaños et al., 2016), pero han sido con una fuerte inclinación al mapeo basado en modelación empírica como USLE (Universal Soil Loss Equation); sin embargo, aún presentan discrepancias o contradicciones en cuanto a las magnitudes relativas a la superficie del territorio nacional afectada y las tasas de erosión calculadas por región (López, 2016).

Las discrepancias observadas en los estudios de erosión (CONAFOR-UACh, 2013; López, 2016) basados en modelación (USLE), podrían tener tres causas probables: 1) uso excesivo de valores por defecto para variables edáficas y vegetación, definidas respectivamente como factores de la ecuación USLE como erodabilidad (K) y el factor de escurrimiento (C) (Montes et al., 2011); 2) omisión de la función de controladores naturales de la erosión, como son la respuesta instantánea de la vegetación y la resiliencia del suelo (Kuske, Yeager, Johnson, Ticknor y Belnap et al., 2012; Amundson, Arjun, Justine, Kyungsoo y William, 2015; Osuna et al., 2019); y 3) no considerar la variabilidad del escurrimiento durante y después la lluvia (Zhao, Huang y Wu, 2016; He, Qin, Zheng y Li, 2018; Onnen, Eltner, Heckrath, y Van Oost, 2020).

Zhao et al (2016) estudiaron los cambios en las depresiones y montículos formados durante la lluvia, y encontraron que se produce un retardo en el flujo superficial y la producción de sedimentos comparado con superficies suaves o sin obstáculos, y aclaran que mientras los montículos contribuyen en las tasas de erosión, las depresiones limitan su dinámica.

He et al (2018) demostraron la influencia del microrelieve en la infiltración del agua, salpicamiento, flujo superficial y la orientación de escorrentías, y concluyeron que el índice de rugosidad puede ser empleado para pronosticar la magnitud del escurrimiento y producción de sedimento en suelo desnudo.

Onnen et al (2020) evaluaron durante siete meses la evolución de la rugosidad superficial bajo condiciones naturales en parcelas de 2 m^2 mediante técnicas de

teledetección basadas en el uso de sensores aéreos cercanos, y confirman la importancia de este tipo de mediciones, ya que podrían ayudar a parametrizar modelos de erosión.

2. OBJETIVO GENERAL

Caracterizar el fenómeno de la erosión hídrica en suelos de ladera del centro de México, para explicar procesos erosivos sometidos a diferentes prácticas de manejo y contribuir en la parametrización de modelos de erosión.

2.1 Objetivos específicos

- Estudiar las propiedades físicas, químicas y biológicas de suelos de ladera del centro de México que determinan su grado de susceptibilidad o erodabilidad a la erosión.
- Analizar la influencia de la lluvia en los cambios de rugosidad superficial y su relación con la producción de sedimentos, considerando antecedentes de ciclos anteriores.
- Comparar las tasas de erosión obtenidas mediante la técnica del perfilómetro de varillas con las estimadas a partir de la técnica de modelación USLE.

3. HIPÓTESIS

Las tasas de erosión hídrica se explican adecuadamente a partir de datos relacionados con el cambio de la rugosidad (CR) comparado con información de datos gravimétricos (DG), obtenida en muestras de agua después de cada evento de lluvia. Es decir, estadísticamente se demostrará lo siguiente:

$$H_0: CR \neq DG$$

4. REVISIÓN DE LITERATURA

4.1 Suelo

Es la capa superior de la corteza terrestre transformada por la intemperie y procesos físicos, químicos y biológicos. Que está compuesta de partículas minerales, materia orgánica, agua, aire y organismos vivos organizados en los horizontes del suelo (FAO, 2015).

El suelo juega un papel importante en la sostenibilidad de los ecosistemas y el sostén de la vida humana. Desde el soporte y sustento de cultivos y vegetación natural, a los cuales aporta los nutrientes vitales para su desarrollo, a la retención, filtrado y depuración del agua en su recorrido hacia los acuíferos, la captura de carbono, que de otro modo aumentaría los gases con efecto invernadero y el sostén de gran número de microorganismos, entre otros aspectos. Sin embargo, estas funciones son poco reconocidas por la sociedad, lo que ha derivado en su descuido, abandono y, por ende, deterioro de este (Cotler et al., 2007).

El suelo es un recurso natural esencial para la vida, ya que desarrolla diversas funciones que posibilitan la producción de alimentos, fibras y madera; mantienen la capacidad de retención de agua, regulan los gases de efecto invernadero y alojan una gran biodiversidad (Cotler et al., 2015).

4.2 Erodabilidad

La erodabilidad es la susceptibilidad del suelo a la erosión, debido a la facilidad de desprendimiento de sus partículas por acción del agua o el viento, unos de los principales factores que pueden influir en un grado erosivo alto son la pendiente, cubierta vegetal y clase textural. La erodabilidad es dinámica, ya que es muy cambiante con el paso de los años e incluso durante una tormenta. Los suelos pueden variar en su contenido de humedad y con ello en su resistencia a la erosión (FAO, 1993).

4.3 Características edáficas asociadas a la erodabilidad

4.3.1 Plasticidad

La plasticidad es la capacidad de adquirir y mantener una nueva forma cuando se aplica una presión y a continuación se retira, los suelos plásticos pueden clasificarse en ligeramente plásticos, plásticos o muy plásticos, según la presión necesaria para deformarlos en estado húmedo. El aumento de la plasticidad esta correlacionado con el incremento del contenido de arcilla (Thompson & Troeh, 2002).

4.3.2 Pegajosidad

La pegajosidad es una medida de la tendencia del suelo húmedo a adherirse a otros objetos. Los suelos arenosos no son pegajosos, mientras que suelos con alto contenido de arcilla hace que sea ligeramente pegajoso, pegajoso o muy pegajoso. Cuando el contenido hídrico desciende por debajo de la capacidad de campo o supera la saturación, desaparece la pegajosidad (Thompson & Troeh, 2002).

4.3.3 Cohesión

La cohesión se define como la distribución espacial asimétrica de la molécula que produce un desbalance de cargas, una de estas tiene carga positiva y la otra carga negativa, mostrando polaridad. Por esta asimetría las moléculas del agua se asocian entre sí a través de puentes de hidrogeno. Esta propiedad de formar puentes de hidrogeno, no solo entre sí, si no con otros compuestos y sólidos, así como su polaridad, permiten al agua su acción solvente, lo que beneficia a las plantas, ya que de esta manera los elementos esenciales para su crecimiento están disueltos y disponibles en el agua, formando la llamada solución del suelo (Núñez, 2000).

4.4 Propiedades físicas del suelo relacionadas con su erodabilidad

4.4.1 Textura

La textura del suelo se define de acuerdo con la presencia relativa de minerales primarios contenidos en una muestra de suelo de arena, limo y arcilla en un rango igual o menor a 2 mm. El tamaño de cada componente mineral está establecido en dos sistemas de clasificación: El Sistema Internacional de la Sociedad Internacional de la Ciencia del Suelo (ISSS, por sus siglas en Inglés) y el Sistema Americano del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de América (USDA, por sus siglas en inglés). La diferencia entra ambas clasificaciones radica en el grupo de las arenas, ya que en el Sistema USDA considera cinco categorías, en tanto que el Sistema Internacional solamente dos (Cuadro 1).

Cuadro 1. Dimensiones en mm de los minerales primarios arena, limo y arcilla definidos en dos sistemas de clasificación

Sistema USDA	Diámetro	Sistema Internacional	Diámetro
	mm		*mm*
Arena muy gruesa	2.0 – 1.0	Arena muy gruesa	2.0 – 0.20
Arena gruesa	1.0 – 0.5	Arena fina	0.20 – 0.02
Arena media	0.5 - 0.25	Limo	0.02 – 0.002
Arena fina	0.25 - 0.10	Arcilla	< 0.002
Arena muy fina	0.10-0.05		
Limo	0.05 - 0.002		
Arcilla	< 0.002		

Fuente: Khan (2013).

4.4.2 Estructura

Las partículas primarias del suelo como arena, limo y arcilla se asocian por diferentes mecanismos físico-químicos y biológicos para formar agregados y unidades de mayor tamaño; en los mecanismos físico-químicos se identifican las fuerzas de cohesión y adhesión, la primera tiene que ver con la atracción

molecular de partícula a partícula debido a sus cargas eléctricas (+ y -), conocidas como fuerzas de “Van der Waals”; en tanto que la segunda, la adhesión es una propiedad que depende del contenido de agua y las fuerzas hidrostáticas que se producen cuando está en contacto con los componentes sólidos del suelo (Khan, 2013; Porta, López y Poch, 2014).

Por otro lado, los mecanismos bilógicos están influenciados por la actividad biológica y la presencia de materia orgánica (Laban et al., 2018); por ejemplo, la presencia de lombriz roja (*Eisenia foetida*) consume material terreo y secreta material enriquecido y pegajoso, lo que contribuye en el mejoramiento del proceso de agregación del suelo (Porta et al., 2014).

La estructura del suelo afecta directamente la aireación, el movimiento del agua en el suelo, la conducción térmica, el crecimiento radicular y la resistencia a la erosión. El agua es el componente elemental que afecta la estructura del suelo con mayor importancia debido a su solución y precipitación de minerales y sus efectos en el crecimiento de las plantas (Khan, 2013; FAO, 2019).

4.5 Propiedades erodibles del suelo

4.5.1 Humedad del suelo

La humedad se define como la magnitud de agua contenida en una unidad de suelo, alojada en su espacio poroso, y su contenido puede expresarse en términos de humedad volumétrica (Θ) o humedad gravimétrica o masa de agua (m_w). La humedad edáfica es muy dinámica, y su variación depende de varios factores, como son: el clima, la vegetación, la profundidad del perfil de suelo, así como de las características y condiciones físicas del perfil (Flores & Alcalá, 2010).

4.5.2 Capacidad de campo (CC)

La CC, se refiere a la cantidad relativamente constante de agua que contiene un suelo saturado después de 48 horas de drenaje. Este ocurre por la trasmisión del agua a través de los poros mayores de 0.05 mm de diámetro, sin embargo, la capacidad de campo puede corresponder a poros que varían entre 0.03 y 1 mm de diámetro (Khan, 2013).

El concepto de CC se aplica únicamente a suelos bien estructurados donde el drenaje del exceso de agua es relativamente rápido; si el drenaje ocurre en suelos pobremente estructurados, por lo general continuará durante varias semanas y este tipo de suelos de estructura tan pobre raramente tiene una CC claramente definida. Por otra parte, en cuanto a la agricultura se refiere, es una de las constantes de mayor importancia, ya que indica la cantidad máxima de agua que retienen los suelos contra la fuerza de gravedad a una magnitud de -10 kPa (kilo pascales), y cuyo exceso por encima de CC puede ser perjudicial tanto para las plantas como para el suelo. Así pues, cuando el suelo está a capacidad de campo se siente muy húmedo en contacto con las manos (Fitzpatrick, 2012).

4.5.3 Punto de marchitez permanente (PMP)

El PMP Se refiere al contenido de agua de un suelo que ha perdido toda su agua a causa del cultivo y, por lo tanto, el agua que permanece en el suelo no está disponible para el mismo. En esas condiciones, en que el cultivo está permanentemente marchito y no puede revivir cuando se le coloca en un ambiente saturado de agua, la retención de la humedad alcanza una tensión de -1,500 kPa. Empíricamente, se ha observado que en PMP de sequedad relativa, el suelo se siente casi seco o muy ligeramente húmedo (Fitzpatrick, 2012; Khan, 2013).

4.5.4 Capacidad disponible de agua o humedad disponible (HD)

La HD es la cantidad de agua que pueden aprovechar las plantas para su crecimiento, y con ello, las funciones fisiológicas implicadas en su desarrollo y fructificación, siempre y cuando haya (otras) condiciones ambientales adecuadas, tales como radiación solar, temperatura del aire y del suelo, humedad relativa, etc. Aunque la HD se define como la diferencia entre CC y PMP (Eq. 1) (Salcedo et al., 2007; Fitzpatrick, 2012; Khan, 2013).

$$HD = CC - PMP \qquad \text{(Eq. 1)}$$

Por lo tanto, los valores de HD dependen primordialmente de la clase textural correspondiente, pero Salcedo et al (2007) mencionan que esta propiedad

también se reconoce que esta es susceptible de modificación debido al manejo del suelo (Cuadro 2).

Cuadro 2. Humedad aprovechable

Textura	CC	PMP	HD
Arenoso	9	2	7
Arenoso-Franco	14	4	10
Franco arenoso - limoso	23	9	14
Franco	34	12	22
Franco-arcilloso	30	16	14
Arcilloso	38	34	14
Arcilloso con buena estructura	50	30	20

Fuente: TRAXCO (2021)

4.5.5 Saturación

Se refiere al contenido de agua del suelo cuando prácticamente todos los espacios están llenos de agua. En los suelos bien drenados es un estado temporal ya que el exceso de agua drena de los poros grandes por influencia de la gravedad para ser reemplazada por aire (FAO, 2005).

4.5.6 Porosidad del suelo

El espacio poroso del suelo se refiere al porcentaje del volumen del suelo no ocupado por sólidos. En general el volumen del suelo está constituido por 50% materiales sólidos (45% minerales y 5% materia orgánica) y 50% de espacio poroso. Dentro del espacio poroso se pueden distinguir macro poros y micro poros donde agua, nutrientes, aire y gases pueden circular o retenerse. Los macro poros no retienen agua contra la fuerza de la gravedad, son responsables del drenaje, aireación del suelo y constituyen el espacio donde se forman las raíces (FAO, 2019).

4.6 Propiedades químicas

4.6.1 Intercambio iónico en suelos

El intercambio iónico (IC) se define como el conjunto de procesos reversibles mediante los que las partículas coloidales de suelo (adsorbentes), debido a la carga que soportan, retienen los iones (adsorbatos), cationes y aniones, de la disolución el suelo, liberando al mismo tiempo otros iones en cantidades equivalentes alas adsorbidas, estableciéndose un equilibrio entre ambas fases. En forma condensada y general, el proceso de intercambio iónico en suelos puede representarse por la reacción (Navarro & Navarro, 2013) que se muestra a continuación (Eq. 2):

$$\text{Suelo-M1+M2X} \leftrightarrow \text{Suelo-M2+M1X} \qquad \text{(Eq. 2)}$$

Donde, M1 y M2 representan iones en cantidades equivalentes y equilibradas (X) en ambos lados de la ecuación reversible, actuando sobre la superficie de intercambio de los coloides orgánicos e inorgánicos del (Suelo-). El símbolo "-" indica carga negativa neta del suelo.

El IC además de retener e intercambiar iones sobre las superficies coloidales minerales y orgánicas, funciona como regulador de acidez, la dinámica de nutrientes, la retención de plaguicidas, la formación de horizontes y el mantenimiento de la estructura de los suelos; en resumen, el IC, además de ser reversible, es instantáneo y estequiométrico (FAO, 2019).

Por su parte, los componentes minerales que componen el suelo, como son la arena y el limo, debido a su tamaño en un límite inferior de hasta 0.002 mm (Cuadro 1) y superficie específica (área/masa) En cuanto a la capacidad de adsorción de iones de otras fracciones del suelo no coloidales (limo y arena), ya que, al ser materiales de mayor tamaño, su superficie especifica es menor (FAO, 2019).

4.6.2 Capacidad de intercambio catiónico (CIC)

Es una medida de cantidad de cargas negativas presentes en las superficies de los minerales y componentes orgánicos del suelo (arcilla, materia orgánica o sustancias húmicas) y representa la cantidad de cationes que las superficies pueden retener (Ca, Mg, Na, K, NH_4+, etc.). Estos serán intercambiados por otros cationes o iones de hidrogeno presentes en la solución del suelo y liberados por las raíces. El nivel de CIC indica la capacidad de suelos a retener cationes, disponibilidad y cantidad de nutrientes a la planta, su pH potencial entre otras. Por lo que un suelo con bajo CIC indica baja habilidad de retener nutrientes, arenoso o pobre en materia orgánica. La unidad de medición de CIC es en centimoles de carga por kg de suelo cmolc/kg o mEq/ 100g de suelo (FAO, 2019).

4.6.3 pH del suelo

El pH (potencial de hidrógeno) determina el grado de adsorción de iones (H+) por las partículas del suelo e indica si un suelo está acido o alcalino. Es el indicador principal en la disponibilidad de nutrientes para las plantas, influyendo en la solubilidad, movilidad, disponibilidad y de otros constituyentes y contaminantes inorgánicos presentes en el suelo. El valor del pH en el suelo oscila entre 3.5 (muy ácido) a 9.5 (muy alcalino). Los suelos muy ácidos (<5.5) tienden presentar cantidades elevadas y tóxicas de aluminio y manganeso. Mientras que los suelos muy alcalinos (>8.5) tienden a dispersarse (FAO, 2019).

4.6.4 Conductividad eléctrica

Es la capacidad de la solución acuosa del suelo para transportar corriente eléctrica y es directamente proporcional al contenido de sales disueltas o ionizadas contenidas en la solución. Generalmente la CE se expresa en unidades de miliSiemens por metro (mS/m). Esta propiedad, puede servir como un indicador de la salinidad del suelo (López & Estrada, 2015).

4.6.5 Nutrientes del suelo

son sustancias químicas que permiten a las plantas su desarrollo y crecimiento. Cuando estos nutrientes no son suficientes propician que la planta no se desarrolle debidamente, que se vuelva propensa a enfermedades o ataques de insectos. Las plantas necesitan elementos minerales que se clasifican en macro (N, P, K, S, Mg y Ca) y micronutrientes (Zn, Fe, Mn, Cl, Cu, B y Mo) los primeros se requieren en grandes cantidades y los últimos en muy pequeñas cantidades (López & Estrada, 2015).

4.7 Biología del suelo

La biología del suelo es la ciencia que se ocupa del estudio de los organismos que actúan sobre el suelo modificando su composición, estructura y funcionamiento. Existen diversos microorganismos que cambien dichas características de suelo, las cuales se clasifican de acuerdo a su tamaño:

- Macrofauna: son organismos mayores a 1 cm de diámetro. Es decir, se pueden observar a simple vista y efectúan sobre el suelo cambios físicos y, en algunos casos, cambios químicos. Estos pueden ser vertebrados
- Mesofauna: son aquellos con diámetros que están entre doscientas micras y 1 cm, Se encargan de producir en el suelo cambios físicos Y químicos, los de mayor Importancia son los nematodos.
- Microfauna: su principal actividad es la transformación química correspondiente a los procesos de humificación y mineralización de la materia orgánica. Tienen un diámetro entre 20 y 200 micras, los que tienen un mayor impacto dentro de este grupo son los protistos, que comprende a los organismos eucariotas (Ramírez, 1997).

Además, tiene la función de aporte de nutrientes (N, P y S) y micronutrientes (B y Mo) a los microorganismos y fuente de energía. Además de los nutrientes que contiene en sí misma, las partículas de materia orgánica atraen a los nutrientes del suelo fijándolos en sus superficies en forma fácilmente asimilable para las plantas.

4.7.1 Física relacionada con la biología del suelo

Resulta fundamental para dar al suelo una buena estructura y con agregados estables. Las sustancias húmicas tienen un marcado poder aglomerante; se unen a la fracción mineral y dan buenos flóculos en el suelo originando una estructura grumosa estable, con una elevada porosidad y aireación, lo que implica que la permeabilidad del suelo sea alta, facilitando de esta manera el drenaje y evitando el encharcamiento.

Las partículas de humus se encuentran desequilibradas eléctricamente y atraen a las moléculas de agua por lo que la materia orgánica tiene una gran capacidad de retención de agua lo que facilita el asentamiento de la vegetación. Por otro lado, protege al suelo de la erosión con la incorporación de restos vegetales y animales sobre la superficie del suelo, protegiéndolo así de la erosión hídrica y eólica. Por otra parte, gracias a su alto poder aglomerante, el humus, forma agregados estables que protegen a sus partículas elementales de la erosión.

4.7.2 Química relacionada con la biología del suelo

Las sustancias húmicas tienen propiedades coloidales, debido a su tamaño y carga retienen agua, hinchan, contraen, fijan soluciones en superficie, dispersan y floculan. Por otra parte, la materia orgánica fija iones de la solución del suelo, los cuales quedan débilmente retenidos en posiciones de cambio, (son asimilables por los vegetales) y evita por tanto que se produzcan pérdidas de nutrientes en el suelo por lavado.

Las sustancias húmicas tienen carácter anfótero, es decir que se comportan como ácidos o bases débiles en función del pH, por lo que se pueden cargar negativamente o positivamente y por ello se unen a cationes o a aniones.

4.8 Definición de erosión

Según Almorox, López & Rafaelli (2010) la erosión es la remoción y perdida de suelo, por la acción del agua, el viento y actividades humanas, provocando de

esta manera la perdida de los nutrientes y materia orgánica del suelo. Una forma importante de degradación es la compactación, relacionada con el pastoreo intensivo y la mecanización excesiva en áreas agrícolas están ligados íntimamente al grado de compactación existente en el suelo. Esto provoca cambios en las condiciones físicas y disminución de la tasa de infiltración del suelo, lo que afecta al crecimiento de las plantas y aumenta la susceptibilidad a la erosión (Espinoza et al., 2011).

Bolaños et al (2016), clasifican la erosión en apreciable y no apreciable, las cuales se describen a continuación:

4.8.1 Erosión apreciable

Es en la que se puede detectar a simple vista la remoción del suelo superficial, sobre la cual se puede apreciar que tan severo es el grado de la erosión. Este puede manifestarse de tres maneras, la más importante es la erosión extrema, en esta la proporción de la superficie terrestre erosionada es superior al 90 %. Otro tipo es la erosión fuerte, esta condición se da cuando el grado erosivo que presenta el suelo está entre el 50 % y 90 %. Y el suelo estable ocurre cuando el suelo no tiene evidencias que indique algún tipo de afectación, esta Generalmente sucede cuando la cobertura vegetal es abundante (Bolaños et al., 2016).

4.8.2 Erosión no apreciable

Cuando es necesario un análisis de elementos de fotointerpretación y la disposición de elementos cartográficos adicionales para lograr establecer algunas evidencias de erosión, por ejemplo: la posición en el relieve, el grado de afectación humana sobre la cobertura original del suelo y la erodabilidad de éste. Dentro de esta se tienen dos tipos una de ellas es la moderada, en la cual solo se encuentra un grado bajo de erosión después de hacer un análisis profundo con fotointerpretación. La otra es la erosión leve, en la que a pesar de realizar

análisis de fotointerpretación no se encuentran evidencias significativas de erosión (Bolaños et al., 2016).

4.9 Tipos de erosión

4.9.1 Erosión hídrica

La erosión acelerada del suelo por acción del agua trae consigo impactos ambientales tales como la perturbación en la regulación del ciclo hidrológico; bajos rendimientos en la producción agrícola y pecuaria; degradación de la cubierta vegetal; pérdida de la biodiversidad; disminución de la vida útil de las obras hidráulicas por la cantidad de sedimentos que transporta el agua; sedimentación en el lecho de los ríos, y desestabilización de laderas que favorecen las catástrofes, produciendo así pérdidas de seres humanos, daños a viviendas e infraestructura, y disminución de tierras agrícolas (Montes, Uribe & García, 2011).

4.9.2 Erosión eólica

La erosión eólica se produce en relación con la velocidad del viento, originada por efecto de las fuerzas de fricción ejercidas por la superficie terrestre sobre el flujo de aire. El proceso de esta erosión depende de la relación entre las fuerzas ejercidas por el viento sobre las partículas de suelo en la superficie terrestre y la resistencia que ejercen las mismas a ser levantadas y desplazadas con el flujo de aire (Goldberg & Weiss, 2004).

4.10 Microrrelieve

El microrrelieve del suelo describe la variación en la elevación de la superficie a través de un campo y constituye la disposición espacial de la variación microtopográfica en la elevación de la superficie del suelo en escalas que van desde centímetros a milímetros o menos. Las características de la superficie del suelo, incluido el microrrelieve, la cohesión y la estabilidad granular del suelo, son factores primarios que influyen en los procesos de erosión y escorrentía, y de

estas características, el microrrelieve del suelo es un parámetro significativo (He et al, 2018).

Por otra parte, la rugosidad superficial del suelo (SSR) es uno de los factores que influencia significativamente la erosión eólica e hídrica a la que se ve sometido el suelo. Dicha característica se basa en la afección de dicho factor en la emisión y la retención de partículas del suelo durante los eventos de erosión (García, 2006). Así mismo, la SSR es expresado como el cambio de altura con respecto a la forma general del microrrelieve del suelo se ha demostrado que la SSR influye en la infiltración de agua, la cantidad de salpicaduras, el flujo superficial y la ruta de la escorrentía (He et al, 2018).

La microtopografía superficial, o rugosidad de la superficie del suelo (SSR), juega un papel importante en los procesos de lluvia, escorrentía y erosión. La heterogeneidad espacial de los elementos de rugosidad provoca patrones de escorrentía y erosión localizados que son diferentes de una superficie lisa (Giménez y Govers, 2002). Por ejemplo, el tiempo de inicio de la escorrentía de la superficie rugosa es más largo que el de la superficie lisa debido al almacenamiento de depresión. La confluencia de agua de escorrentía y el desarrollo de redes de arroyos son significativamente diferentes entre superficies con diferente microtopografía inicial (Zhao et al, 2016)

La respuesta a la erosión depende fundamentalmente de las condiciones de la superficie del suelo, como la rugosidad de la superficie del suelo (SSR), la cobertura de residuos / plantas, la formación de costras o el contenido de humedad inicial del suelo. Específicamente, la SSR, que describe el microrrelieve de los suelos, se considera un factor de erosión importante ya que influye en la capacidad de almacenamiento superficial de agua y sedimentos (Onnen, Eltner, Heckrath, Van Oost, 2020).

4.11 Métodos de medición

4.11.1 Ecuación universal de la pérdida de suelo (USLE por sus siglas en ingles)

Es un modelo de erosión diseñado para predecir las pérdidas promedio de suelo en la escorrentía de áreas de campo específicas en cultivos especificados y sistemas de gestión. El uso generalizado del campo tiene demostrado su utilidad y validez para este propósito. También es aplicable para condiciones no agrícolas como los sitios de construcción (Wischmeier & Smith, 1978).

4.11.2 Parcelas de sedimentación

Es un método ampliamente utilizado para cuantificar la erosión hídrica, la cual consiste en medir la cantidad de suelo lavado en parcelas acotadas. Para instalarlas se colocan a lo largo y ancho de la parcela paredes que pueden ser de madera, metal o plástico para delimitar la superficie. Para la recolección de sedimentos se colocan contenedores en sentido de la pendiente, donde quedaran almacenadas las partículas después de una lluvia (Folliontt, Brooks, Neary, Pizarro & García, 2013).

4.11.3 Método de clavos y rondanas

Este método se considera uno de los más sencillos y fáciles de aplicar. Consiste en colocar clavos con rondanas, colocados a lo largo de un transecto a intervalos regulares. La rondana se coloca sobre la superficie del suelo, tocando ligeramente la cabeza del clavo, el cual se coloca en el centro de esta. El propósito de la rondana es marcar cortes en el terreno ocasionados por erosión y de esta forma medir el espesor de la capa del suelo perdido (Mendoza, 2005).

4.11.4 Método del perfilómetro de varillas

La metodología basada en la realización de perfiles con varillas ha sido la primera que se desarrolló para la toma de datos sobre el relieve y microrrelieve superficial del suelo y, por tanto, la más utilizada a lo largo de las investigaciones que se

han llevado a cabo y la más ampliamente validada en campo. La metodología se basa en un conjunto de varillas móviles, que pueden desplazarse verticalmente, que se adaptan a una estructura, y que se elevan de acuerdo a las diferentes alturas del suelo, al colocarlas en la superficie a medir (García, 2006).

5. MATERIALES Y METODOS

El presente trabajo se llevó cabo en el Centro de Ciencias Agropecuarias de la Universidad Autónoma de Aguascalientes, ubicado en el municipio de Jesús María, Aguascalientes. La unidad de estudio se conforma de dos unidades experimentales (UE) figura 1, La UE 1 (área pecuaria) se sitúa en las coordenadas 21° 58’ 22.98” N y 102° 22’ 27.66” O mientras que la UE 2 (área agrícola) se encuentra en las coordenadas 21° 58’ 36.42” N y 102° 22’ 14.96” O, cuyas colindancias del municipio al norte son: San José de Gracia y Pabellón de Arteaga, al este San Francisco de los Romo, al sur Aguascalientes y al oeste Calvillo (INEGI, 2017).

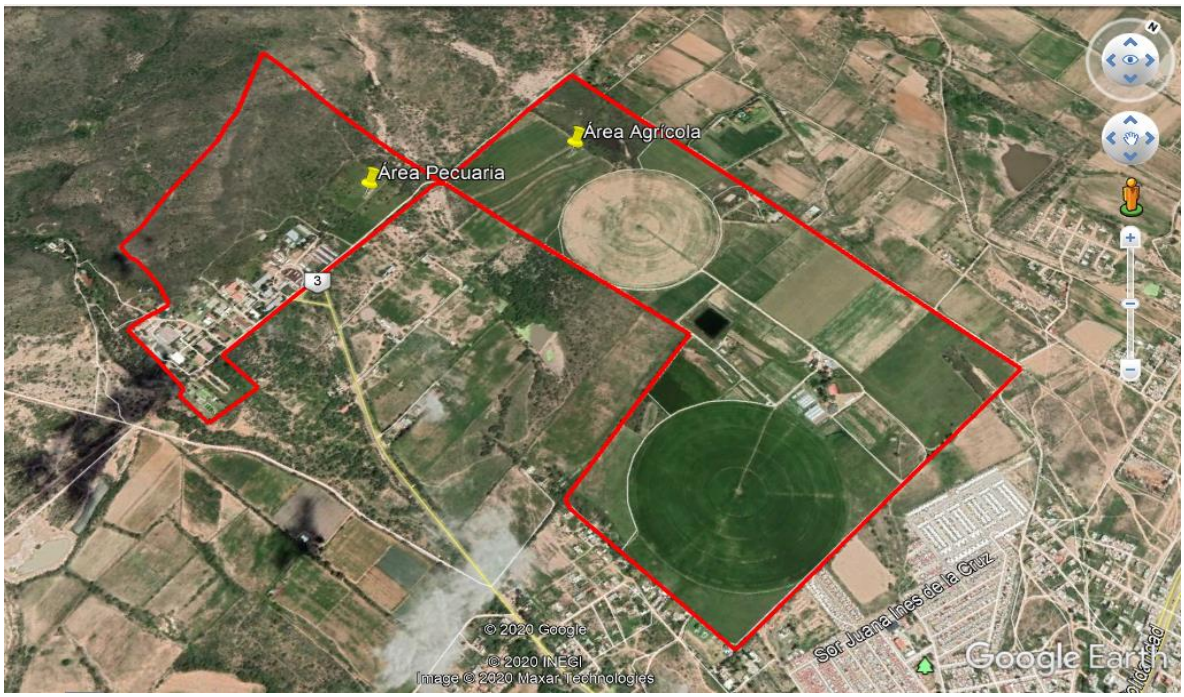


Figura 1. Ubicación del área de estudio

5.1 Parcelas de sedimentación

En las parcelas de escurrimiento ya establecidas en el sentido de la pendiente, las cuales se tienen cuatro tratamientos con tres repeticiones cada uno, teniendo así un total de 12 parcelas tanto en el área agrícola como en el área pecuaria. Se continuó con la toma de datos de escurrimiento en 24 parcelas de sedimentación ya mencionadas con condiciones de suelo diferente, cuyas dimensiones son de 2 m de ancho por 5.80 m de largo, por lo que la superficie de las parcelas es de 11.6 m^2. Estas son estructuras rectangulares, terminando al final de las parcelas en forma de embudo, con una fosa, ubicado en el sentido de la pendiente, en donde fue colocado un bidón de 50 litros, esto con el fin de captar los escurrimientos de agua con sedimentos.

Se cuenta con dos unidades experimentales, una ubicada en el área pecuaria (AP) y otra en el área agrícola (AA). En cada una de estas unidades experimentales, se tienen cuatro tratamientos, de los cuales cada uno tiene tres repeticiones. A continuación, se da una breve descripción de estos tratamientos:

Suelo desnudo (T1): en este tratamiento se pretende que el suelo permanezca descubierto de manera que las gotas de lluvia tengan un impacto directo, de esta manera simular aquellas áreas desprovistas de vegetación, ya sean áreas sobre pastoreadas y caminos (Figura 2a).

Barbecho (T2): en este tratamiento se simulan las condiciones de cómo se encuentra el área agrícola antes de ser sembrada, de esta manera ver el efecto que conlleva esta práctica (Figura 2b).

Barbecho con esquilmo (T3): este tratamiento consiste en incorporar residuos vegetales sobre el barbecho, de manera que se pueda apreciar el efecto que estos tienen sobre la retención o arrastre de partículas de suelo ante un evento de lluvia (Figura 2c).

Pastizal inducido (T4): este tratamiento consistió en introducir pastos en cada una de las unidades de estudio, en la unidad experimental 1 AP, zacate Buffel (Cenchrus ciliaris L.) y zacate Rhodes (Chloris gayana Kunth) en la unidad

experimental 2 AA. Las repeticiones de este tratamiento se intercalaron entre los tres tratamientos antes mencionados (Figura 2d).

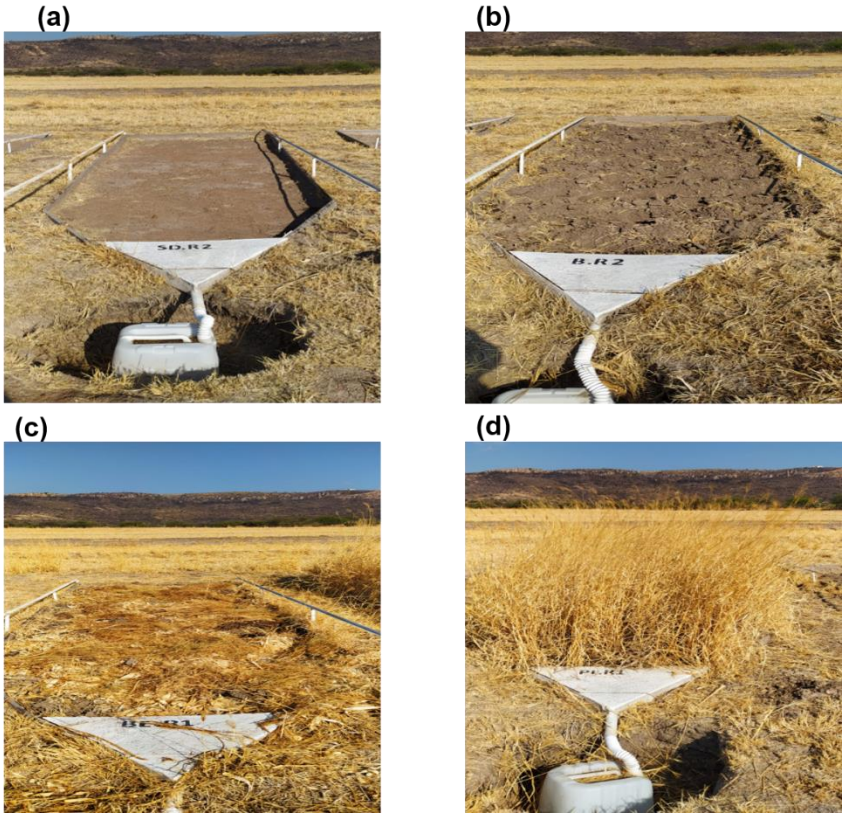


Figura 2. Tratamientos: Suelo desnudo (a), Barbecho (b), Barbecho con esquilmo (c), Pastizal inducido (d).

5.1.1 Toma de muestras para la cuantificación de sedimentos

Después de un evento de lluvia, se acudió a las parcelas experimentales, en las cuales se mide en los pluviómetros la cantidad de agua que llovió registrándola en las notas. Enseguida, se coloca fuera del pozo cada bidón (Figura 3a) de todas las camas experimentales. Enseguida se toma del depósito de sedimentos un

litro medido con una probeta (Figura 3b), para lo cual, previamente se agita el recipiente, con el fin de que no queden sedimentos adheridos al bidón.

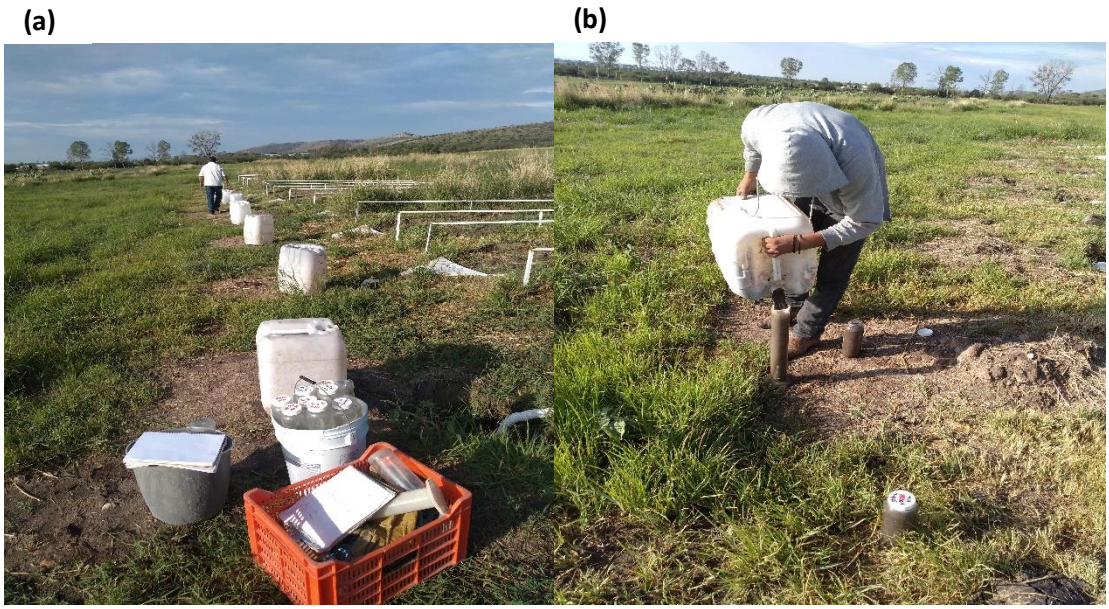


Figura 3. Toma de muestras de agua con sedimentos.

Se asigna un clave a cada muestra colectada, con base en el área, si es agrícola o la pecuaria, la condición de suelo (desnudo, pastizal, barbecho con esquilmo o barbecho) y la otra condición en el número de muestreo que corresponda.

Estas muestras se llevaron al laboratorio del Centro de Ciencias Agropecuarias de la Universidad Autónoma de Aguascalientes, las cuales se someten a un proceso de filtrado del agua y los sedimentos se mantengan en el filtro cuantitativo de 15 cm GDO. 42 (94-15) PK-100, para esto, se revuelven los recipientes que contienen las muestras colectadas, de tal manera que no queden sedimentos adheridos en el fondo de los mismos. Para iniciar el filtrado, se etiqueta cada uno de los filtros (previamente pesados, Figura 4a), con la clave asignada según corresponda la muestra a filtrar.

Enseguida a los filtros se les da una forma de cono, y se colocan en embudos para empezar el filtrado, para lo cual se añade la muestra poco a poco hasta que esta se haya terminado (Figura 4b).

Posteriormente, los filtros se someten a un proceso de secado en la estufa a 105 °C durante 24 horas (Figura 4c), después se pesa cada una de las muestras (Figura 4d) y así obtener los sedimentos obtenidos en cada muestra.

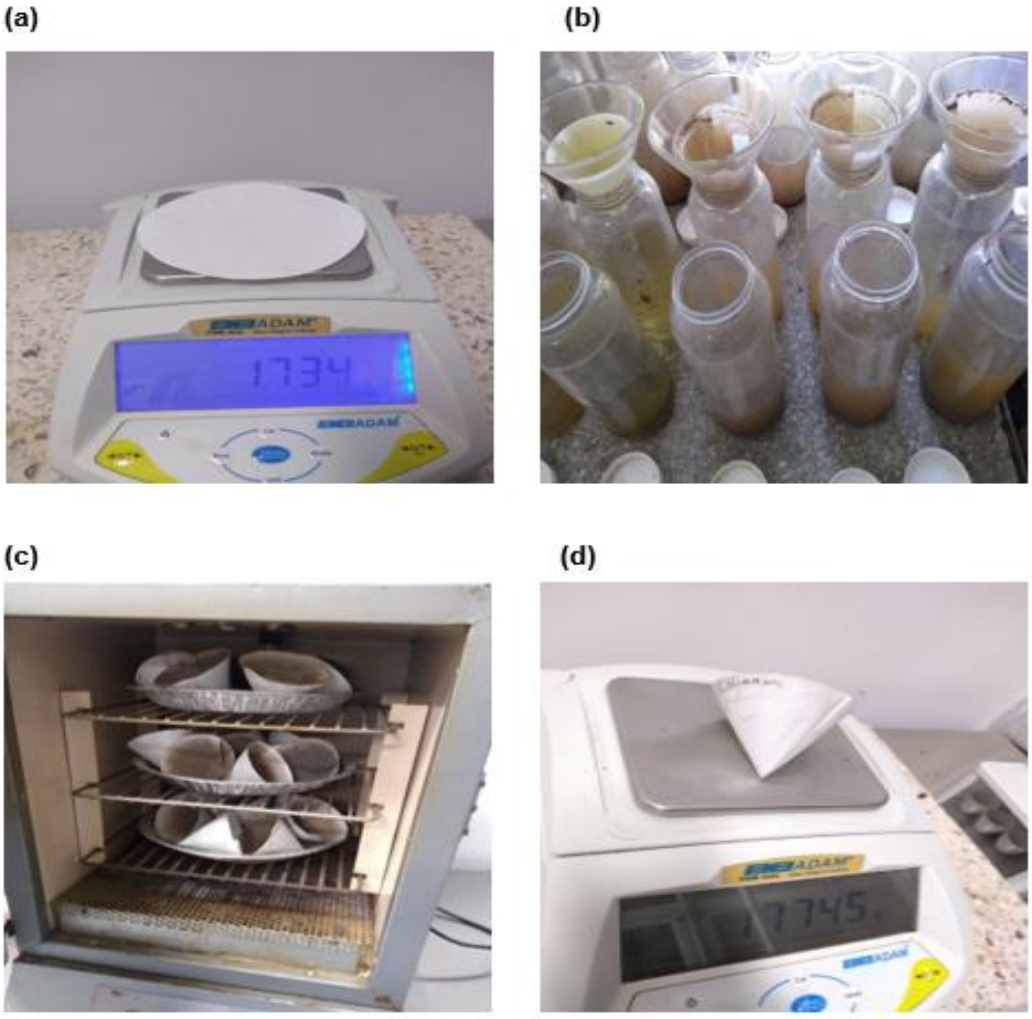


Figura 4. a: pesado del papel filtro, b: filtrado de muestras, c: secado de muestras, d: pesado de muestras.

Una vez que ya se tienen todos los datos a utilizar como el volumen captado en el bidón, la precipitación de cada evento y el área de las parcelas, se procede a realizar los cálculos de pérdida de suelo mediante el procedimiento propuesto por Becerra (1999).

Por otra parte, se les dio mantenimiento a las parcelas de sedimentación, que consiste en la limpieza alrededor de las mismas. Para el caso de las parcelas con suelo desnudo y barbecho la limpieza también se realiza dentro de estas. En el caso de las parcelas de barbecho con esquilmo se le añade rastrojo de cultivos, de tal manera que siempre permanezca constante la cantidad de esquilmo en la superficie de las parcelas.

5.2 Uso del modelo USLE

La aplicación de esta ecuación se llevó a cabo mediante el desarrollo de cada uno de los factores que proponen Wischmeier & Smith (1978).

$$A = R * K * L * S * C * P \qquad (1)$$

A continuación, se describe cada uno de los factores que tiene la ecuación general de la pérdida de suelo.

$R = \sum_{i=1}^{m}(EI30)$ (2) $EI_{30} = (Ec)(I30)$ (3)

Donde:

- R= factor de erosividad de la lluvia expresado en MJ ha^{-1} $año^{-1}$
- M= número de eventos del año
- EI30= Índice de erosividad para un evento (MJ mm^{-1} ha^{-1} hr^{-1})
- Ec= energía cinética total de la lluvia (MJ ha^{-1})
- I30= intensidad máxima de la lluvia en 30 minutos (mm hr^{-1})

K= factor de erosionabilidad del suelo (Mg ha^{-1} MJ^{-1} mm^{-1}), está dada por la siguiente ecuación (Wischmeier & Smith, 1978):

$$\mathbf{A = 0.1317 * \left[\frac{2.1*10^{-4}(12-MO)M^{1.14}+3.25(S-2)+2.5(P-3)}{100}\right]} \qquad (4)$$

Donde:

- 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).
- 0.1317 es un factor de conversión del sistema de unidades inglés al métrico internacional

En el caso del factor L y S que son la longitud y grado de la pendiente respectivamente, se puede calcular con la siguiente ecuación (Wischmeier & Smith, 1978). Para nuestro caso se tomarán datos ya conocidos descritos en años anteriores.

$$LS = \left(\frac{\lambda}{22.13}\right)^{m} \qquad (5)$$

$$S = 0.065 + 0.045_{s} + 0.0065_{s^2} \qquad (6)$$

$$LS = \left(\frac{\lambda}{22.13}\right)^{m} (0.065 + 0.045_{s} + 0.0065_{s^2}) \qquad (7)$$

Donde:

- λ: es la longitud de la pendiente (m)
- s: es la pendiente del terreno (%)
- m: del factor de la longitud de pendiente

Donde:

$$m = \frac{\sin\theta}{0.05+\sin\theta+0.269(\sin\theta)^{0.8}} \qquad (8)$$

Dónde: θ es el ángulo de la pendiente.

Factor C

Es un factor de cultivo y manejo del cultivo (adimensional) (Wischmeier y Smith, 1978).

Factor P

Es un factor de prácticas de manejo (adimensional) (Wischmeier y Smith, 1978).

5.3 Medición del Microrelieve

Se realizaron tres mediciones del microrrelieve, la primera se realizó en abril del 2018, la segunda en noviembre de 2018 y la tercera medición se realizó en agosto de 2019, dichas mediciones se llevaron a cabo en parcelas con dos condiciones de rugosidad diferente (suelo desnudo y barbecho) con dimensiones de 11.6 m^2, las cuales se realizaron con el perfilometro de varillas, que consta de un conjunto de varas graduadas colocadas a 20 cm de distancia entre ellas (figura 5). Además, las camas cuentan con una estructura diseñada para realizar estas mediciones. Cabe mencionar que se da mantenimiento a las parcelas experimentales previo a que empiecen las lluvias.

Para lo cual, se coloca el perfilometro en la parte alta de las camas y se empieza a medir en sentido de la pendiente, avanzando cada 20 cm, en cada uno de los puntos se miden las alturas iniciando de izquierda a derecha. Para lo cual, se colocan cada una de las varas de tal manera que estas queden lo más vertical posible, lo que nos facilitara la lectura de las alturas, además de que estas serán más confiables.

Figura 5. Medición del Microrrelieve

Una vez obtenidos estos datos se procedió a trabajarlos de tal manera que obtengamos la tasa de sedimentación, con base en la diferencia de la primera medición realizada y la segunda.

Para esto, utilizamos la siguiente formula:

Tasa de erosión= $\mathcal{L} * \mathrm{A} * \mathrm{Da}$ (9)

$$\mathcal{L} = \sum_{\ell=1}^{\mathrm{n}} 0$$

$$\mathcal{L} = \ell_1 + \ell_2 + \ell_3 + \ell_4 + \cdots + \ell_{\mathrm{n}} \qquad (10)$$

Donde:

$\mathcal{L}$= lamina total

A= área

Da= Densidad aparente

ℓ= lamina de cada evento

Se realizaron simulaciones de los datos obtenidos en el método del perfilometro con los programas RStudio y Surfer 11, con el fin de ver gráficamente la rugosidad del terreno en cada una de las camas experimentales y de esta manera compararlas en los diferentes momentos de muestreo que se realizaron en los tratamientos de barbecho y suelo desnudo. En este caso las imágenes que se muestran en el presente trabajo son las obtenidas mediante el programa Surfer 11.

Por otra parte, se realizó un análisis estadístico de comparación de medias con el programa Minitab 18, de esta manera saber si existen diferencias estadísticas significativas entre tratamientos de cada uno de los métodos de medición.

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1 Parcelas de sedimentación
Año 2019

Para el año 2019 en las parcelas de experimentación del área pecuaria y el área agrícola, se presentaron un total de 14 eventos de lluvia. a continuación, se muestran gráficamente los eventos más erosivos de los cuatro tratamientos evaluados, indicando en que día del calendario juliano ocurrió dicho evento.

En los resultados obtenidos por evento de lluvia en el tratamiento suelo desnudo para la unidad experimental pecuaria (UE 1), se obtuvo mayor pérdida de suelo en los eventos ocurridos los días 195 y 236 con una tasa de 1000 kg ha^{-1} y 750 kg ha^{-1} respectivamente, mientras tanto respecto a la intensidad de la lluvia, se obtuvo una mayor intensidad en los eventos del día 195 con 476.3 MJ mm^{-1} Hr^{-1} ha^{-1} y en el evento del día 236 con 785.5 MJ mm^{-1} Hr^{-1} ha^{-1} (figura 6).

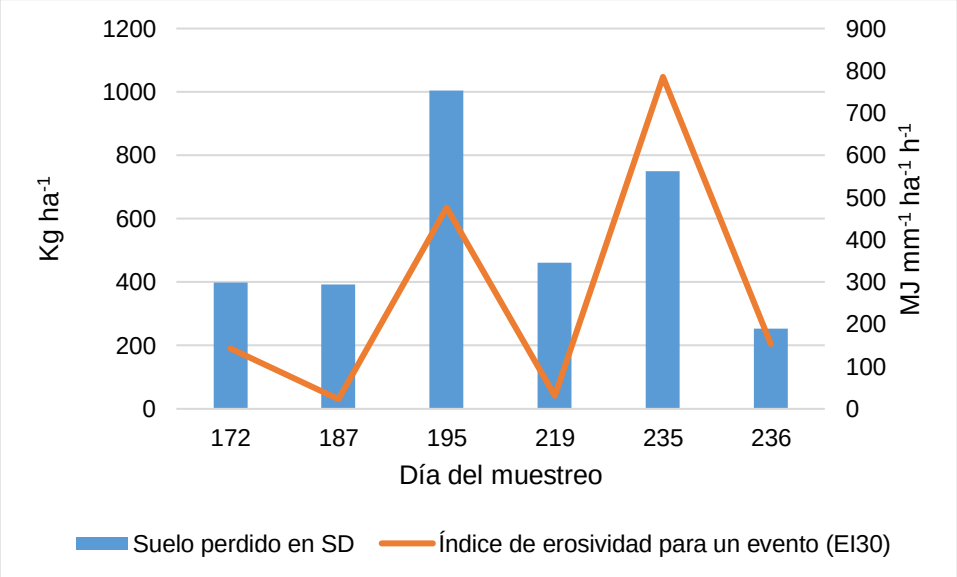


Figura 6. Pérdida de suelo por evento de lluvia en el T1 de la UE1 (área pecuaria).

Por su parte en el tratamiento barbecho, el día 205 fue el que mayor tasa de erosión obtuvo (342 kg ha^{-1}), mientras que el evento ocurrido el día 238 fue el que menos tasa obtuvo con 57 kg ha^{-1}, por otra parte, en el día 235 fue el que

presento una mayor intensidad con 785.5 MJ mm^{-1} Hr^{-1} ha^{-1}, mientras que el evento que presento menos intensidad fue en el día 172 con 142.7 MJ mm^{-1} Hr^{-1} ha^{-1} (figura 7).

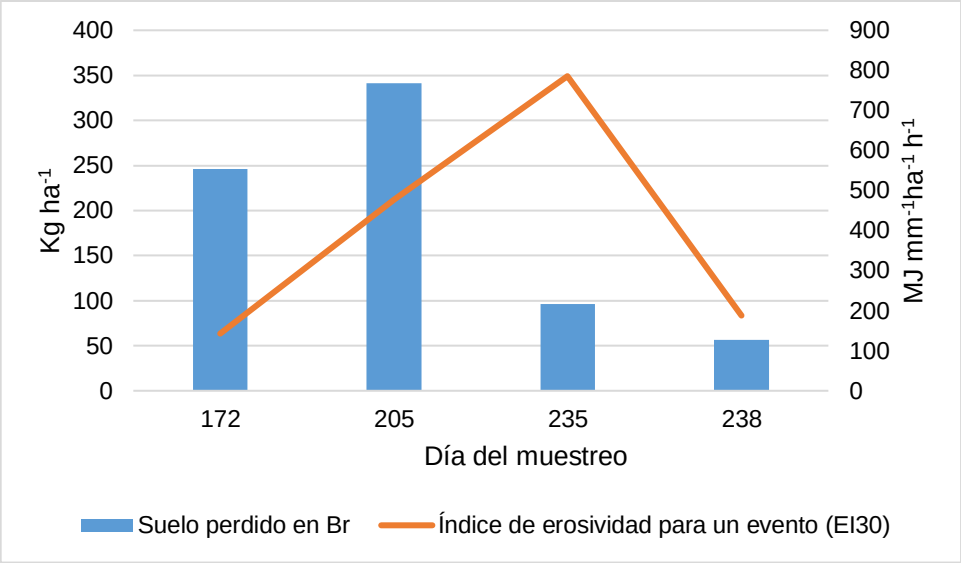


Figura 7. Pérdida de suelo por evento de lluvia en el T2 de la Unidad experimental 1.

En los resultados obtenidos en el tratamiento barbecho con esquilmo, los eventos con mayor tasa son los eventos de los días 172 y 275 (0.8 kg ha^{-1} y 0.6 kg ha^{-1} respectivamente), mientras que los eventos con menor tasa obtenida fueron el evento del día 219 con 0.2 kg ha^{-1} y en el día 204 con 0.3 kg ha^{-1}, por otro lado, los eventos que más intensidad presentaron ocurrieron en los días 235 y 195 con una intensidad de 785.5 MJ mm^{-1} Hr^{-1} ha^{-1} y 476.3 MJ mm^{-1} Hr^{-1} ha^{-1} respectivamente (figura 8).

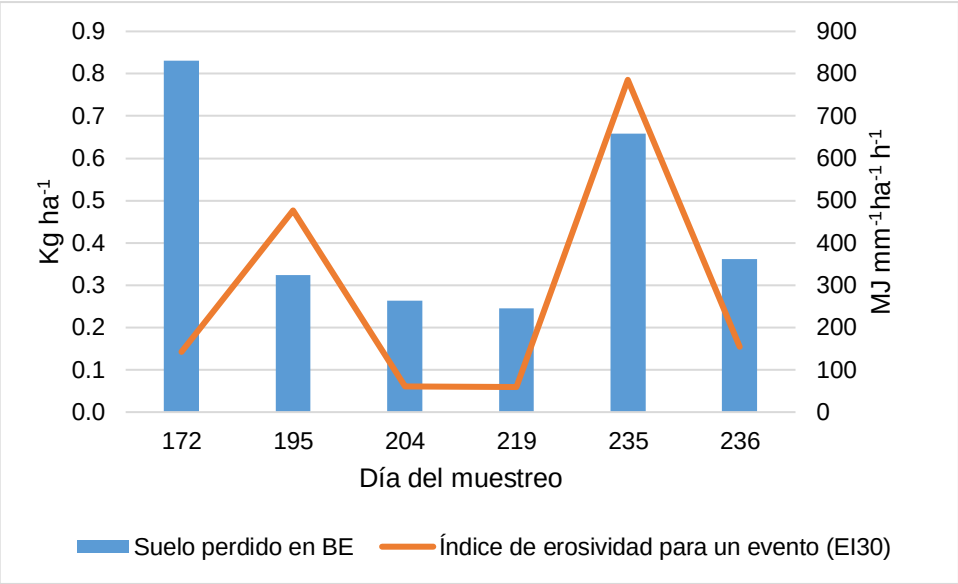


Figura 8. Pérdida de suelo por evento de lluvia en el T3 de la Unidad experimental 1.

En el tratamiento pastizal inducido los eventos ocurridos los días 172 y 234, fueron los que obtuvieron mayor tasa con 0.37 kg ha^{-1} y 0.29 kg ha^{-1} respectivamente, así mismo, los eventos con menos tasa ocurrieron los días 195 y 236 (0.014 kg ha^{-1} y 0.25 kg ha^{-1} respectivamente), por otra parte, la mayor intensidad de la lluvia se presentó en los eventos que ocurrieron 235 los días con 785.5 MJ mm^{-1} Hr^{-1} ha^{-1} y 195 con 476.3 MJ mm^{-1} Hr^{-1} ha^{-1}, mientras que en los eventos de los días 236 y 172 fueron los que menor intensidad presentaron con intensidades de 154.1 MJ mm^{-1} Hr^{-1} ha^{-1} y 142.5 MJ mm^{-1} Hr^{-1} ha^{-1} respectivamente (figura 9).

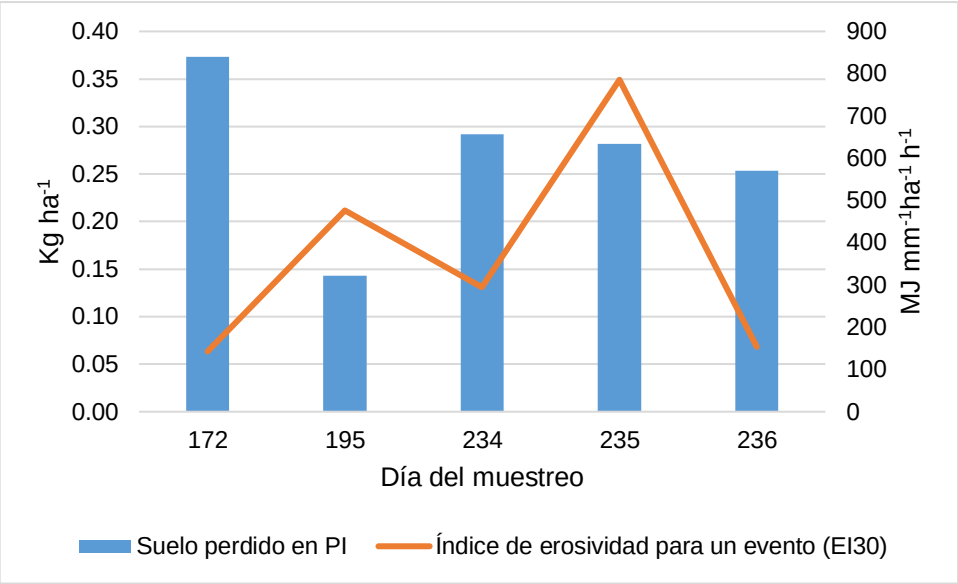


Figura 9. Pérdida de suelo por evento de lluvia en el T4 de la Unidad experimental 1.

En cuanto a la unidad experimental del área agrícola (UE 2), para el T1, las mayores tasas de erosión se encontraron en el evento que ocurrió el día 219 con pérdida de 2891.6 kg ha^{-1} y en el evento del día 239 con 712.4 kg ha^{-1}, en tanto que en los en los eventos que ocurrieron los días 205 kg ha^{-1} y 195 kg ha^{-1} fueron los que tuvieron menos tasa de erosión con 272.7 kg ha^{-1} y 341.8 kg ha^{-1} respectivamente. Para el caso de la intensidad los eventos de los días 172 y 195 son los que más intensidad presentaron con valores de 413 MJ mm^{-1} Hr^{-1} ha^{-1} y 716.71 MJ mm^{-1} Hr^{-1} ha^{-1}, mientras que los eventos de los días 239 y 219 son los que menor intensidad obtuvieron (30 MJ mm^{-1} Hr^{-1} ha^{-1} y 59.3 MJ mm^{-1} Hr^{-1} ha^{-1} respectivamente) (figura 10).

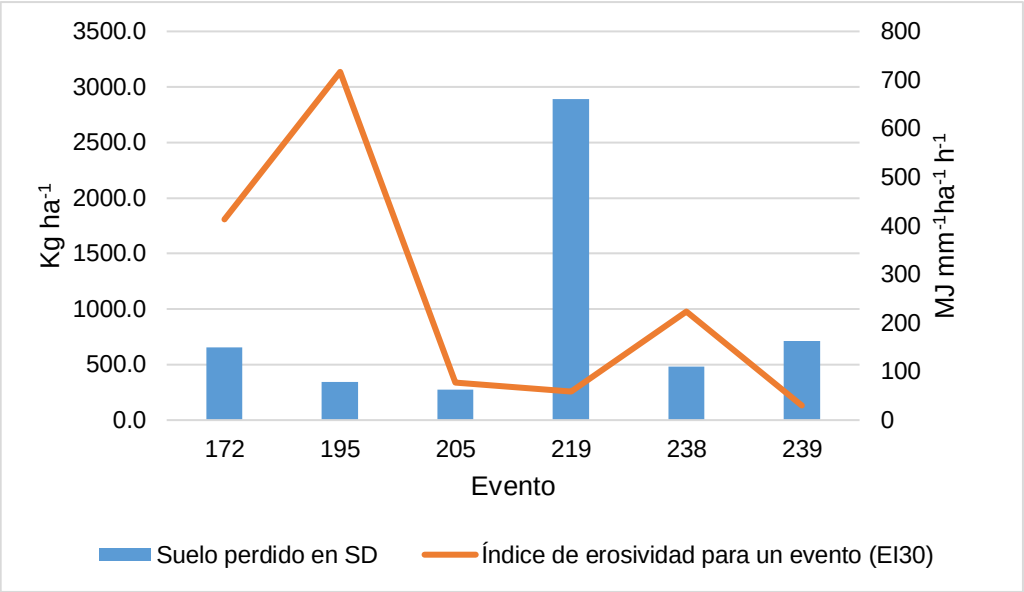


Figura 10. Pérdida de suelo por evento de lluvia en el T1 de la Unidad experimental 2.

En cuanto al tratamiento barbecho de la unidad experimental agrícola, los eventos con más pérdida de suelo se presentaron en los días 172 (306.7 kg ha^{-1}) y 235 (193.2 kg ha^{-1}), mientras que los eventos de los días 234 (27.4 kg ha^{-1}) y 236 (29.1 kg ha^{-1}) fueron los eventos que menor pérdida de suelo tuvieron, así mismo, en estos eventos antes mencionados, se presentó la menor intensidad con valores de 63.9 MJ mm^{-1} Hr^{-1} ha^{-1} y 109.4 MJ mm^{-1} Hr^{-1} ha^{-1} respectivamente. Mientras que los eventos 235 (500.6 MJ mm^{-1} Hr^{-1} ha^{-1}) y 195 (716.71 MJ mm^{-1} Hr^{-1} ha^{-1}) fueron los que obtuvieron una mayor intensidad (figura 11).

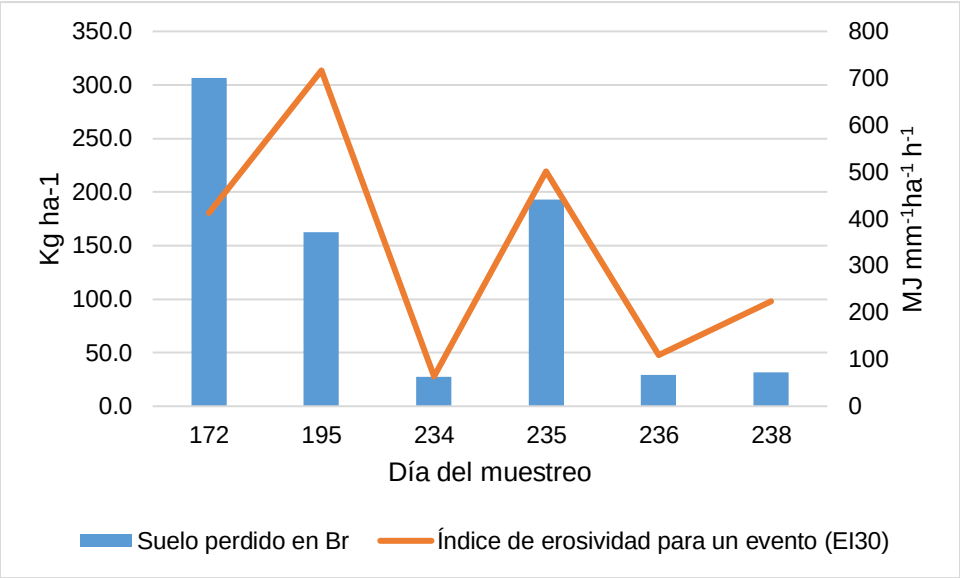


Figura 11. Pérdida de suelo por evento de lluvia en el T2 de la Unidad experimental 2.

En el tratamiento barbecho con esquilmo del área agrícola, los eventos con mayor pérdida se obtuvieron en los días 205 (61.5 kg ha^{-1}) y 238 (30.9 kg ha^{-1}), mientras que la menor pérdida de suelo se obtuvo en los días 195 (20.3 kg ha^{-1}) y 234 (24 kg ha^{-1}). En cuento a la intensidad de la lluvia obtenida en este tratamiento, se encontró una mayor intensidad en los eventos de los días 172 (413 MJ mm^{-1} Hr^{-1} ha^{-1}) y 195 (716.71 MJ mm^{-1} Hr^{-1} ha^{-1}), mientras que la menor intensidad se presentó en los días 234 (63.6 MJ mm^{-1} Hr^{-1} ha^{-1}) y 205 (77.4 MJ mm^{-1} Hr^{-1} ha^{-1}) (figura 12).

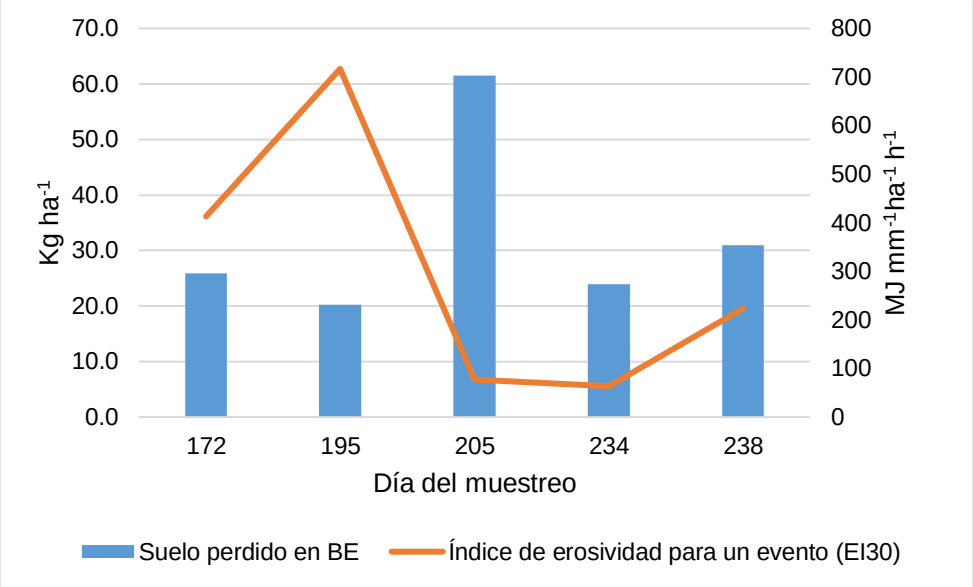


Figura 12. Pérdida de suelo por evento de lluvia en el T3 de la Unidad experimental 2.

Para el tratamiento pastizal inducido del área agrícola, los valores con mayor tasa obtenida se encontraron en los eventos de los días 195 (5.8 kg ha^{-1}) y 238 (5.2 kg ha^{-1}), mientras que en los eventos de los días 172 (0.9 kg ha^{-1}) y 235 (1.5 kg ha^{-1}) fueron los que menor tasa de erosión se obtuvo. En el caso de la intensidad de la lluvia, la mayor intensidad se obtuvo en los eventos ocurridos en los días 235 (500.6 MJ mm^{-1} Hr^{-1} ha^{-1}) y 195 (716.71 MJ mm^{-1} Hr^{-1} ha^{-1}), en tanto que los eventos de los días 236 (109.4 MJ mm^{-1} Hr^{-1} ha^{-1}) y 238 (223.9 MJ mm^{-1} Hr^{-1} ha^{-1}) fueron los que presentaron menor intensidad (figura 13).

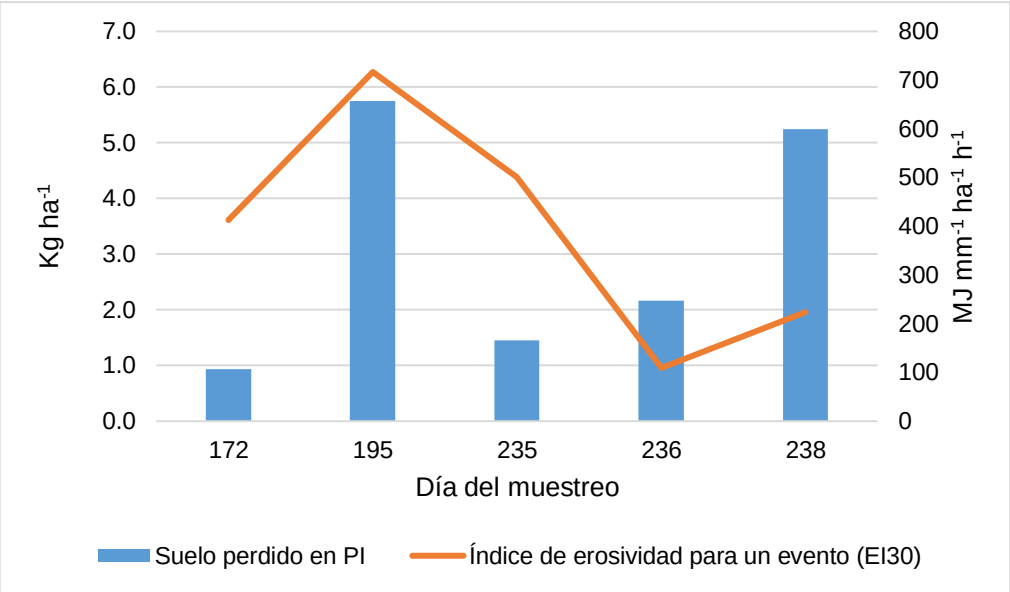


Figura 13. Pérdida de suelo por evento de lluvia en el T4 de la Unidad experimental 2.

Por otra parte, dentro de los resultados obtenidos para el año 2019 en las parcelas de escurrimiento, en los cuatro tratamientos evaluados se obtuvo más arrastre de sedimentos en el tratamiento 1 de la unidad experimental 2 con una tasa de 3.12 ton ha^{-1} $año^{-1}$, seguido de T1AP con una pérdida de 1.34 ton ha^{-1} $año^{-1}$. Por otra parte, los tratamientos con menor pérdida de sedimentos son los tratamientos T3 y T4 del área pecuaria (UE1) con pérdidas de 0.0025 ton ha^{-1} $año^{-1}$ y 0.0008 ton ha^{-1} $año^{-1}$ respectivamente (figura 14).

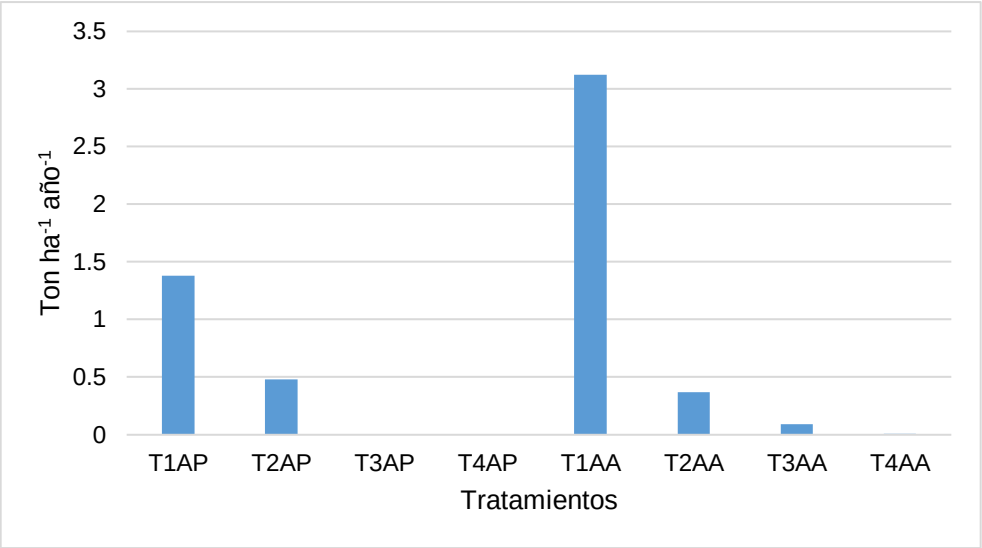


Figura 14. Pérdida de suelo en cada tratamiento de las dos unidades experimentales.

Por otra parte, se realizó una comparación de medias de Tukey con una confiabilidad del 95%, en la cual, tanto en el área agrícola como en el área pecuaria, se obtuvo que existen diferencias significativas en el tratamiento de suelo desnudo (Cuadro 2), en comparación con los tratamientos barbecho, barbecho con esquilmo y pastizal inducido, así mismo, no existen diferencias significativas entre los tres tratamientos antes mencionados.

Cuadro 3. Tasa de erosión obtenida en los tratamientos evaluados en las dos unidades experimentales.

Uso de suelo	Tratamiento	Repeticiones	Tasa de erosión
			t ha^{-1} $año^{-1}$
Pecuario	Suelo desnudo	3	2.457 A
	Barbecho	3	0.613 B
	Barbecho con esquilmo	3	0.00297 B
	Pastizal inducido	3	0.0008 B
Agrícola	Suelo desnudo	3	4.457 A
	Barbecho	3	0.472 B
	Barbecho con esquilmo	3	0.1083 B
	Pastizal inducido	3	0.0059 B

Prueba de Tukey ($P < 0.05$). Medias que no comparten letra son significativamente diferentes.

Pando et al. (2003), mencionan que a través de métodos directos se han estimado valores de erosión para la cuenca alta del río San Marcos en Tamaulipas de 13,5 ton ha^{-1} $año^{-1}$, esto utilizando el método de rondanas. Dichos resultados se encuentran por encima de los resultados obtenidos en este trabajo, sin embargo, podrían estar influyendo factores como el tipo de suelo o método de muestreo que se utilizó.

Año 2020

Mientras que, en los resultados obtenidos en el año 2020, se tienen registrados 11 eventos de lluvia en el área experimental pecuaria, mientras que en el área experimental agrícola se registraron 10 eventos de lluvia. A continuación, se muestran gráficamente los eventos más erosivos de ambas unidades experimentales, indicando el día del calendario juliano en que ocurrieron los eventos.

En el área experimental pecuaria se obtuvo que para los cuatro tratamientos evaluados (suelo desnudo, barbecho, barbecho con esquilmo y pastizal inducido), se obtuvo una máxima intensidad de la lluvia de 37.6 MJ mm^{-1} Hr^{-1} ha^{-1}, mientras que la menor intensidad fue de 7.6 MJ mm^{-1} Hr^{-1} ha^{-1}, por otra parte, la mayor tasa de sedimentación obtenida para el tratamiento suelo desnudo (figura 15) fue de 120.1 kg ha^{-1}, para el tratamiento barbecho (figura 16) fue de 6 kg ton ha^{-1}, para el tratamiento barbecho con esquimo (figura 17) fue de 7 kg ha^{-1} y para el tratamiento de pastizal inducido (figura 18) fue de 1.3 kg ha^{-1}, por otra parte, las tasas de erosión obtenidas más bajas fueron de 1.3 kg ha^{-1}, 1.3 kg ton ha^{-1}, 0.2 kg ha^{-1} y 0.0091 kg ha^{-1} respectivamente.

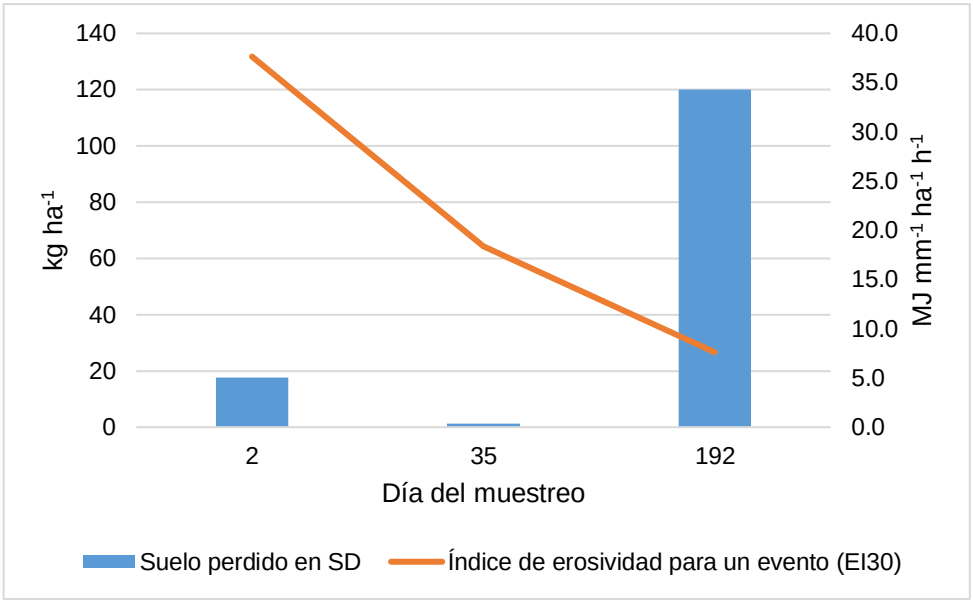


Figura 15. Pérdida de suelo por evento de lluvia en el T1 del área pecuaria.

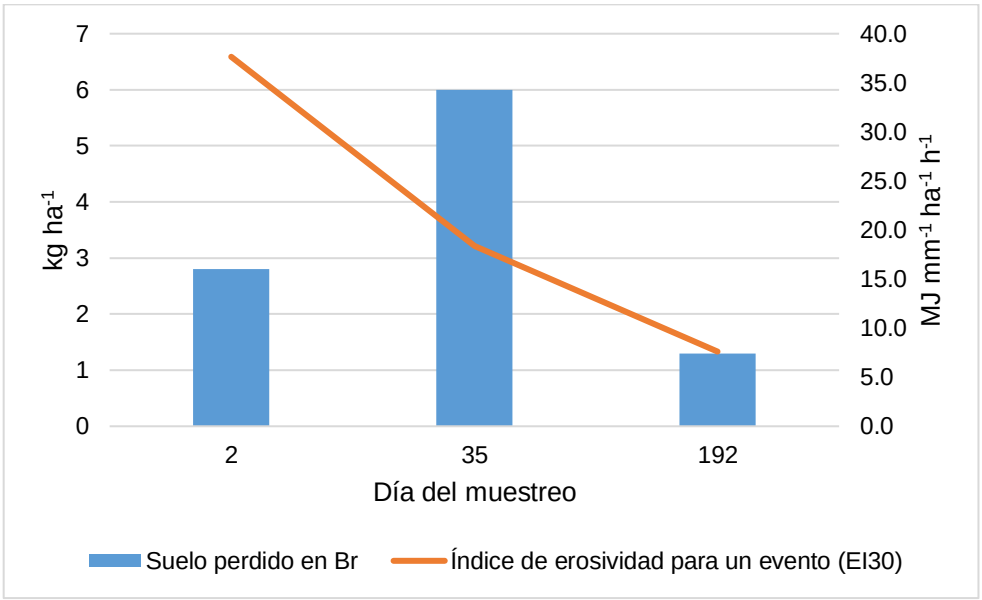


Figura 16. Pérdida de suelo por evento de lluvia en el T2 del área pecuaria.

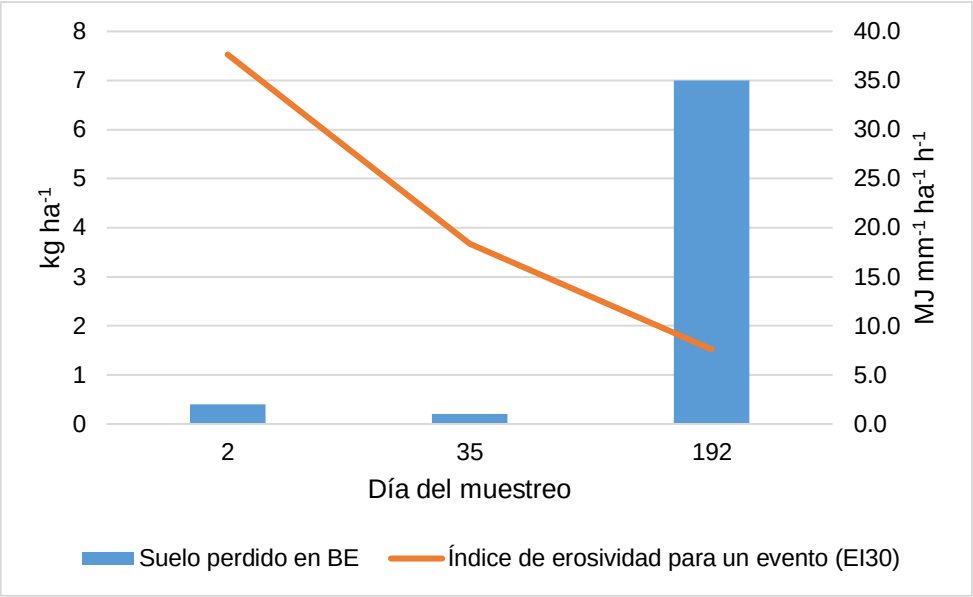


Figura 17. Pérdida de suelo por evento de lluvia en el T3 del área pecuaria.

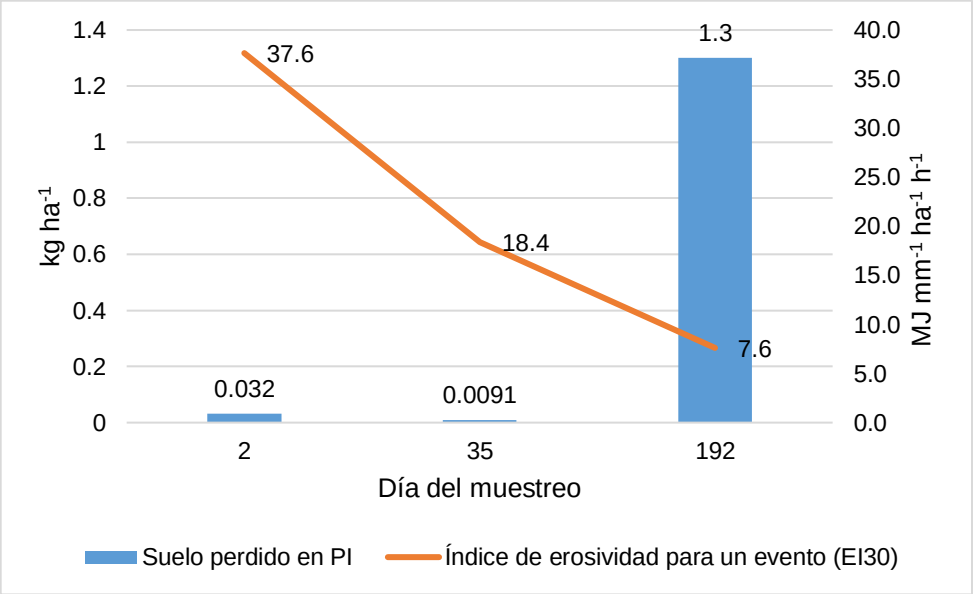


Figura 18. Pérdida de suelo por evento de lluvia en el T4 del área pecuaria.

Así mismo, en los resultados obtenidos en el área experimental agrícola, para los cuatro tratamientos evaluados, se obtuvo una intensidad máxima de la lluvia de

586.3 mm^{-1} Hr^{-1} ha^{-1} obtenida en el evento ocurrido el día 232 del calendario juliano y la intensidad mínima que se obtuvo en el evento que ocurrió el día 212 del calendario juliano fue de 292.4 mm^{-1} Hr^{-1} ha^{-1}, en cuanto a los resultados de tasa de erosión obtenida, en el tratamiento de suelo denudo (figura 19) la tasa más alta fue de 552.1 kg ha^{-1} y la menor tasa obtenida fue de 294 kg ha^{-1}, mientras que en el tratamiento barbecho (figura 20) la tasa más alta fue de 97.3 kg ha^{-1} y la más baja de 8.8 kg ha^{-1}, así pues, en el tratamiento de barbecho con esquilmo (figura 21) se obtuvo 12.1 kg ha^{-1} la mayor tasa y la menor fue de 8 kg ha^{-1} y en el tratamiento de pastizal inducido (figura 22) la mayor tasa fue de 8.8 kg ha^{-1} y la menor fue de 0.9 kg ha^{-1} (figuras 19, 20, 21 y 22).

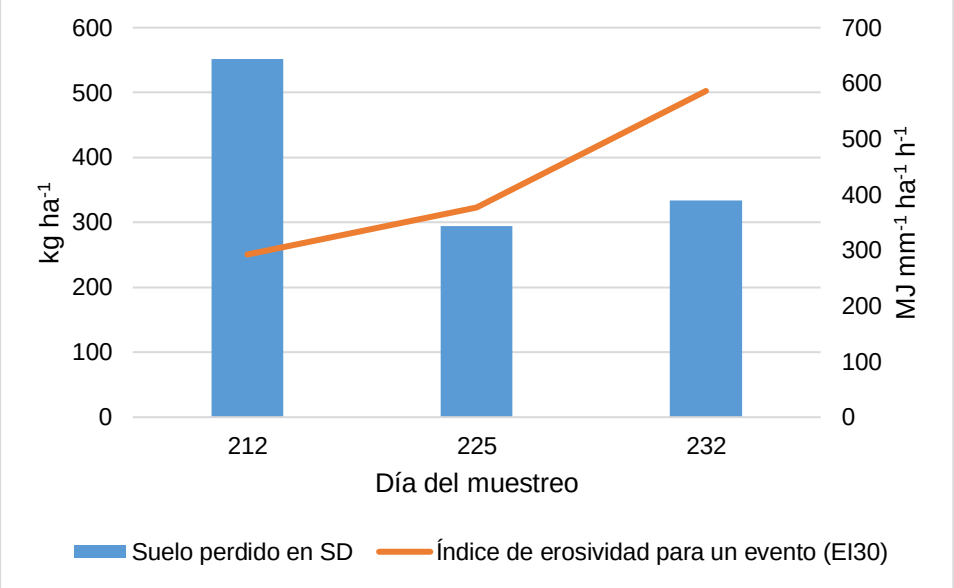


Figura 19. Pérdida de suelo por evento de lluvia en el T1 del área agrícola.

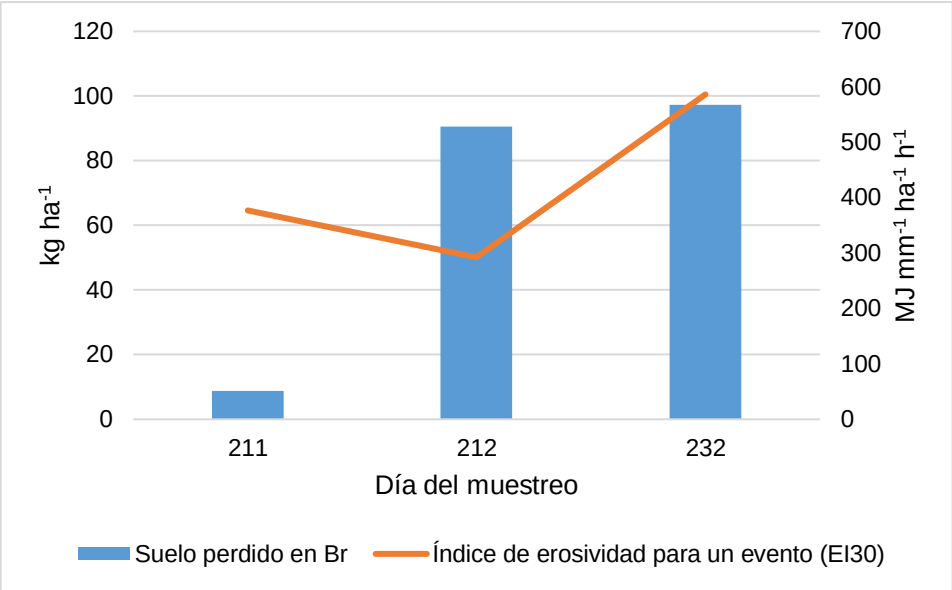


Figura 20. Pérdida de suelo por evento de lluvia en el T2 del área agrícola.

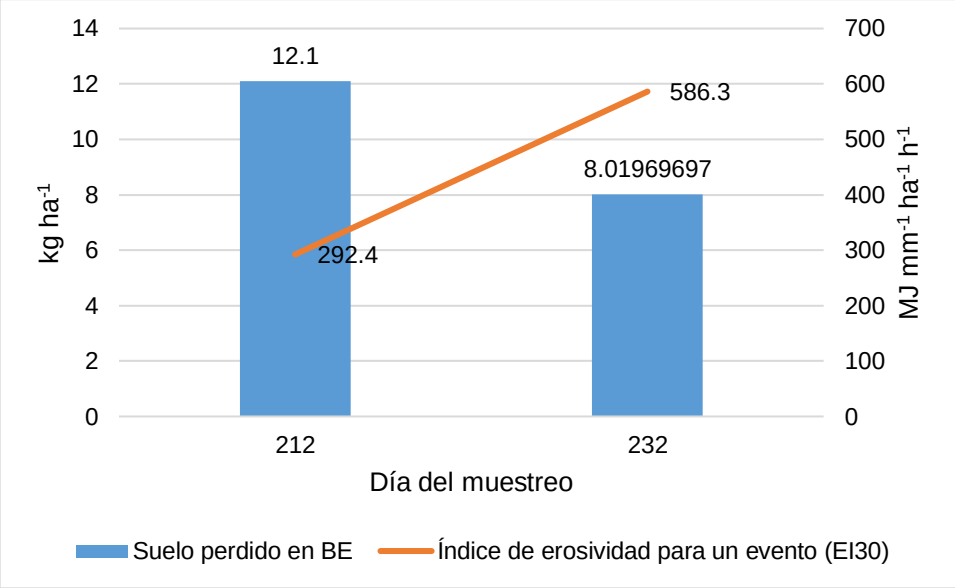


Figura 21. Pérdida de suelo por evento de lluvia en el T3 del área agrícola.

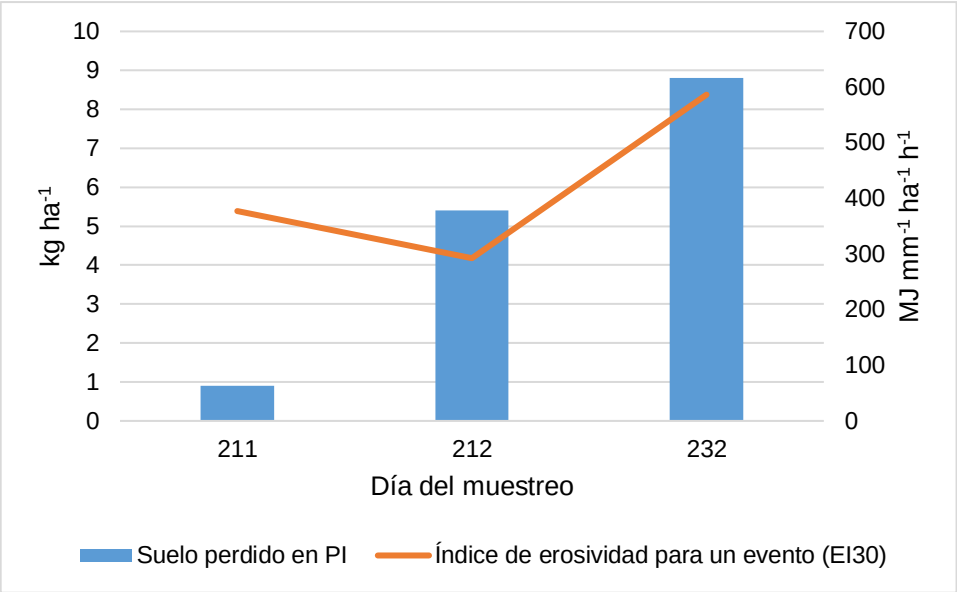


Figura 22. Pérdida de suelo por evento de lluvia en el T4 del área agrícola.

En cuanto a los resultados obtenidos en el año 2020 para el área pecuaria, se obtuvo que el tratamiento con mayor pérdida de suelo fue el tratamiento de Suelo Desnudo con una tasa de erosión de 2.18 ton ha^{-1} $año^{-1}$, mientras que el tratamiento barbecho ocupo el segundo lugar con una tasa de 0.43 ton ha^{-1} $año^{-1}$ (figura 23). En tanto que los tratamientos de Barbecho con Esquilmo y Pastizal inducido obtuvieron una menor pérdida de suelo con tasa de 0.0037 ton ha^{-1} $año^{-1}$ y 0.0018 ton ha^{-1} $año^{-1}$ respectivamente.

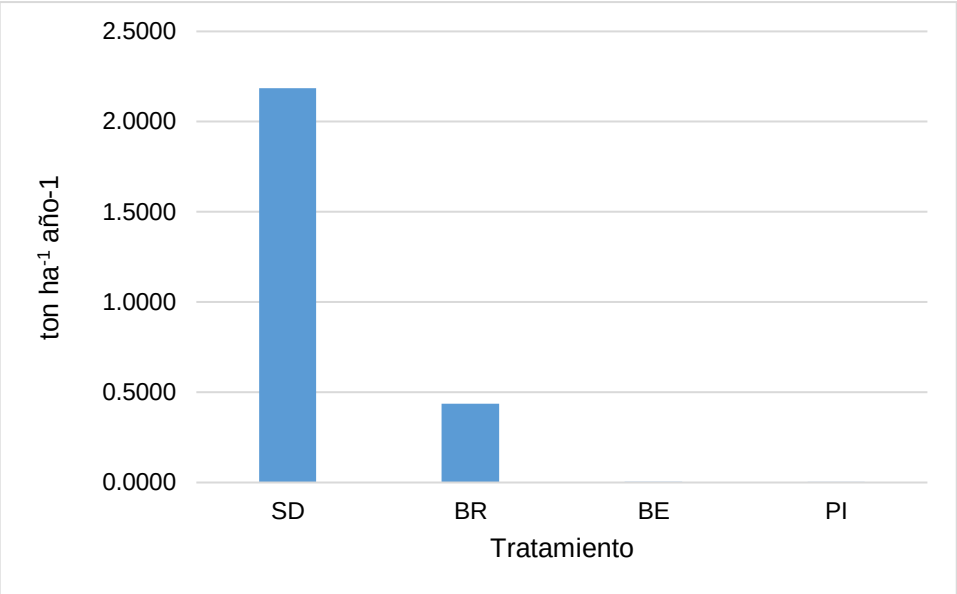


Figura 23. Pérdida de suelo por tratamiento del área experimental pecuaria.

Por otra parte, en cuanto a los resultados obtenidos de sedimentación en el área agrícola se obtuvo que el tratamiento de suelo desnudo fue el que obtuvo mayor pérdida de suelo, con una tasa de 2.42 ton ha^{-1} $año^{-1}$, seguido del tratamiento barbecho con una tasa de erosión de 0.51 ton ha^{-1} $año^{-1}$, y con menos tasa de erosión los tratamientos BE y PI con tasas de 0.017 ton ha^{-1} $año^{-1}$ y 0.0154 ton ha^{-1} $año^{-1}$ respectivamente (figura 24).

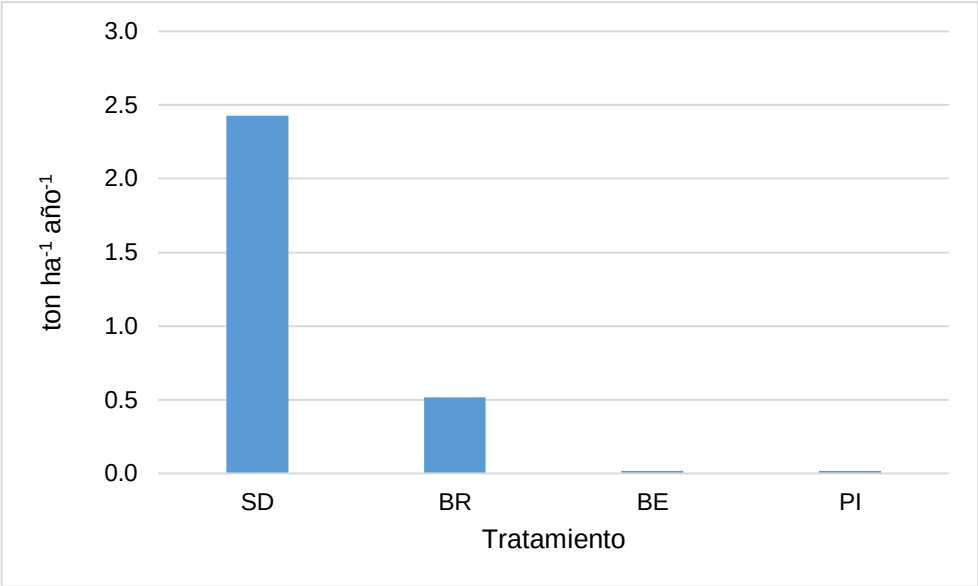


Figura 24. Pérdida de suelo por tratamiento del área experimental agrícola.

Pérez 2017, obtuvo resultados de pérdida de suelos en Durango una tasa de 0.043 ton ha^{-1} $año^{-1}$ en condiciones de suelo desnudo, mientras que en condiciones de barbecho obtuvo una tasa de 0.033 ton ha^{-1} $año^{-1}$. Esto utilizando parcelas de sedimentación. Estos resultados concuerdan con los obtenidos en el presente trabajo.

Se realizó una prueba de comparación de medias de Tukey, con una confiabilidad del 95 %, en la cual se encontró para ambas unidades experimentales, que el tratamiento de Suelo Desnudo es estadísticamente diferente en comparación con los otros tres tratamientos, mientras que entre estos no existe diferencia estadística significativa (cuadro 3).

Cuadro 4. Tasa de erosión obtenida en los tratamientos evaluados en las dos unidades experimentales.

Uso de suelo	Tratamiento	Repeticiones	Tasa de erosión	
			t ha^{-1} $año^{-1}$	
Pecuario	Suelo desnudo	3	2.185	A
	Barbecho	3	0.436	B
	Barbecho con esquilmo	3	0.00373	B
	Pastizal inducido	3	0.00182	B
Agrícola	Suelo desnudo	3	2.427	A
	Barbecho	3	0.517	B
	Barbecho con esquilmo	3	0.0017	B
	Pastizal inducido	3	0.0015	B

Prueba de Tukey ($P < 0.05$). Medias que no comparten letra son significativamente diferentes.

6.2 Modelo USLE

En la evaluación realizada en los cuatro tratamientos para el área experimental agrícola, utilizando el modelo USLE en la unidad experimental 2 (figura 25), se obtuvieron tasas de erosión en los tratamientos suelo desnudo, barbecho y barbecho con esquilmo de 29.63 ton ha^{-1} $año^{-1}$, 29.45 ton ha^{-1} $año^{-1}$, 30.2 ton ha^{-1} $año^{-1}$ respectivamente, mientras que en el tratamiento pastizal inducido se obtuvo una tasa de erosión de 0.86 ton ha^{-1} $año^{-1}$.

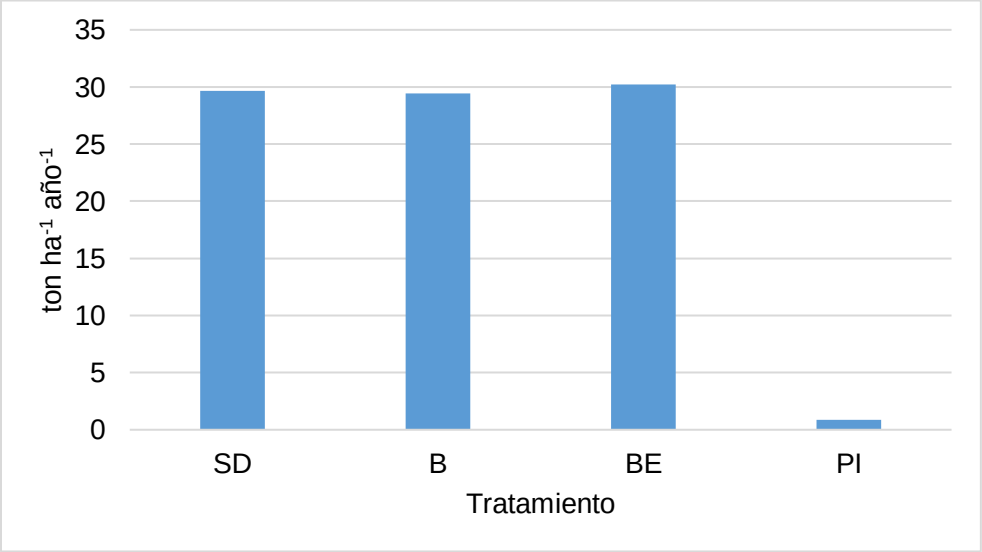


Figura 25. Tasa de erosión por tratamiento obtenida en el área agrícola.

En cuanto a la unidad experimental 1 (área pecuaria) se encontró que el tratamiento con la mayor tasa de erosión fue el suelo desnudo (figura 26) con una tasa de 25.4 ton ha^{-1} $año^{-1}$, seguido del barbecho con esquilmo con 23.41 ton ha^{-1} $año^{-1}$, mientras que el barbecho obtuvo 20.32 ton ha^{-1} $año^{-1}$. El tratamiento que presento menor tasa de erosión fue el pastizal inducido con una tasa de 0.77 ton ha^{-1} $año^{-1}$.

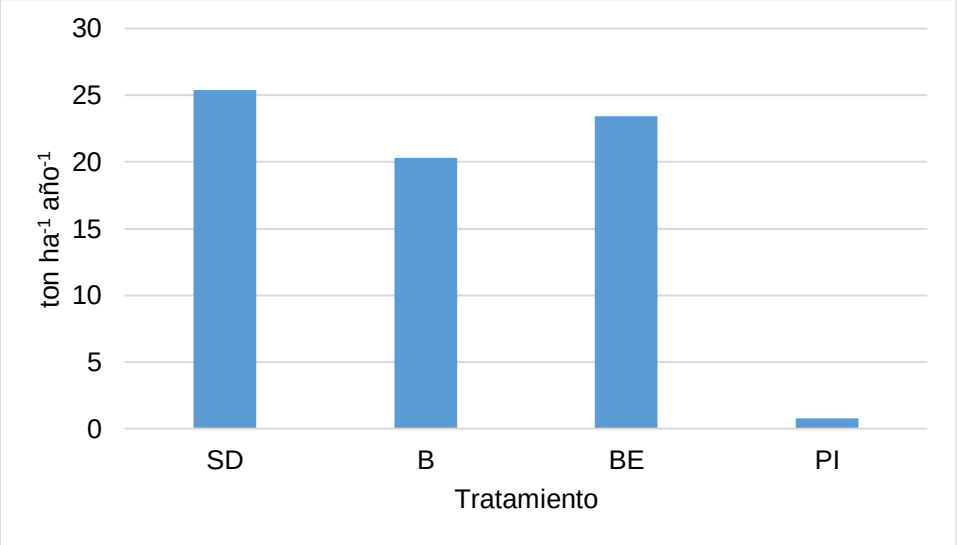


Figura 26. Tasa de erosión por tratamiento obtenida en el área pecuaria.

Prado, Rivera, De León, Carrillo & Martínez (2016), Con valores de 10.1, 0.062 y 1.0, respectivamente, para los factores LS, C y P, y el valor de R medido (2147), empleando el modelo USLE obtuvieron una tasa de erosión de 143.0 ton ha^{-1} $año^{-1}$, cuyo trabajo se realizó en la microcuenca El Malacate, donde en el uso de suelo y vegetación predominaba el uso forestal. Por lo que no concuerdan con los resultados obtenidos en este trabajo, ya que los valores obtenidos en el mismo están por debajo de los calculados por los autores antes mencionados.

Por otra parte, Pando et al. (2003), mencionan que a través de métodos directos se han estimado valores de erosión para la cuenca alta del río San Marcos en Tamaulipas de 13,5 ton ha^{-1} $año^{-1}$ mientras que por métodos indirectos (USLE), la erosión ronda los 492 ton ha^{-1} $año^{-1}$. Dichos resultados están por encima de

los obtenidos en este trabajo, pero cabe mencionar que esta diferencia se puede presentar por las diferentes zonas en las que se realizaron los experimentos.

En el análisis estadístico realizado para la comparación de medias de Tukey con una confiabilidad del 95%, en la unidad experimental 1 (área pecuaria), no se encontraron diferencias significativas en los tratamientos de suelo desnudo y barbecho con esquilmo, pero si se tienen diferencias significativas entre los tratamientos suelo desnudo, en comparación con los tratamientos barbecho y pastizal inducido.

Mientras que en el análisis estadístico realizado para la unidad experimental 2, no se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos suelo desnudo, barbecho y barbecho con esquilmo, sin embargo, si hay diferencias significativas comparando estos tres tratamientos con el tratamiento pastizal inducido (cuadro 4).

Cuadro 5. Tasa de erosión obtenida mediante el modelo USLE en las dos unidades experimentales.

Uso de suelo	Tratamiento	Repeticiones	Tasa de erosión
			t ha^{-1} $año^{-1}$
Pecuario	Suelo desnudo	3	25.399 A
	Barbecho con esquilmo	3	23.416 A B
	Barbecho	3	20.7748 B
	Pastizal inducido	3	0.7748 C
Agrícola	Barbecho con esquilmo	3	30.2 A
	Suelo desnudo	3	29.64 A
	Barbecho	3	29.45 A
	Pastizal inducido	3	0.86 B

Prueba de Tukey ($P < 0.05$). Medias que no comparten letra son significativamente diferentes.

6.3 Método del perfilómetro

En los resultados obtenidos con el método directo del perfilómetro, en cuanto a la comparación del momento 1 contra el momento 2 (M1 vs M2), se obtuvo que en el tratamiento barbecho tanto en el área agrícola como en el área pecuaria, se obtuvo una mayor tasa de erosión con valores de 5.6 ton ha^{-1} $año^{-1}$ y 7.1 ton ha^{-1} $año^{-1}$ respectivamente (figura 27). Por otra parte, el tratamiento de suelo desnudo obtuvo menor tasa de erosión en ambas áreas experimentales, en el área agrícola obtuvo una tasa de erosión de 4.2 ton ha^{-1} $año^{-1}$, mientras que en el área pecuaria obtuvo 0.89 ton ha^{-1} $año^{-1}$

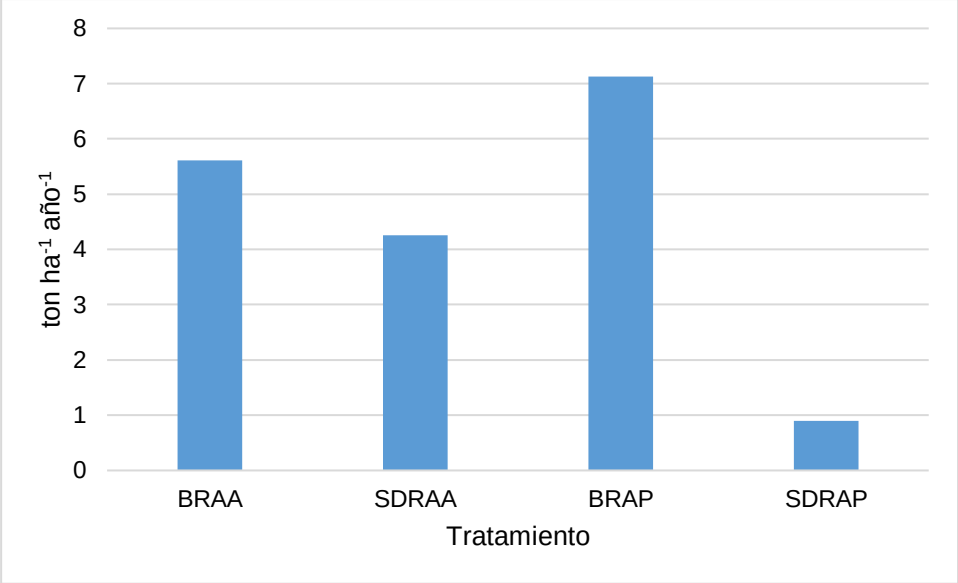


Figura 27. Tasa de erosión por tratamiento obtenida en el área pecuaria.

En cuanto al análisis estadístico realizado para la comparación M1 vs M2, fue una prueba de comparación de medias de Tukey (cuadro 5), en la que se encontró que no existe diferencia estadística significativa entre los tratamientos evaluados tanto para el área agrícola como para el área pecuaria.

Cuadro 6. Tasa de erosión obtenida en los tratamientos evaluados en las dos unidades experimentales con el método del perfilómetro (M1 vs M2).

Uso de suelo	Tratamiento	Repeticiones	Tasa de erosión	
			t ha^{-1} $año^{-1}$	
Pecuario	Suelo desnudo	3	0.899	A
	Barbecho	3	7.126	A
Agrícola	Suelo desnudo	3	4.26	A
	Barbecho	3	5.609	A

Prueba de Tukey ($P < 0.05$). Medias que no comparten letra son significativamente diferentes.

Por otro lado, en cuanto a la comparación realizada del momento 2 y el momento 3 (M2 vs M3), se encontró que el tratamiento barbecho del área agrícola fue el que más pérdida de suelo obtuvo, con una tasa de erosión de 2.7 ton ha^{-1} $año^{-1}$ Seguido del tratamiento suelo desnudo del área pecuaria, mientras que en los tratamientos de suelo desnudo del área agrícola y el barbecho del área pecuaria se obtuvo una ganancia en la lámina del suelo teniendo así, 2.23 ton ha^{-1} $año^{-1}$ y 0.62 ton ha^{-1} $año^{-1}$ respectivamente de esta comparación (figura 28).

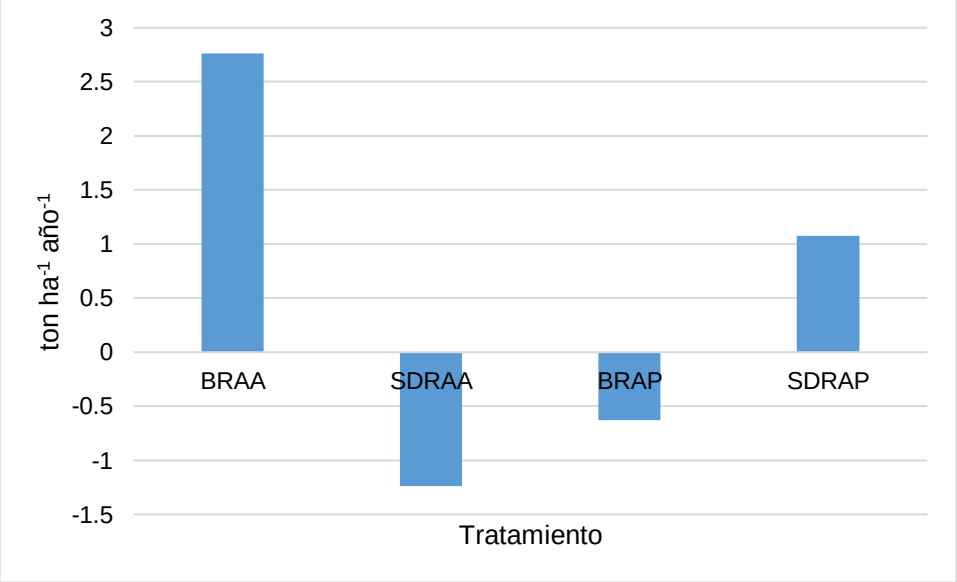


Figura 28. Tasa de erosión obtenida en el área pecuaria.

En cuanto a la comparación de M2 vs M3, también se realizó la prueba de comparación de medias de Tukey (cuadro 6), en la que no se obtuvieron diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos evaluados del área agrícola y del área pecuaria.

Cuadro 7. Tasa de erosión obtenida en los tratamientos evaluados en las dos unidades experimentales con el método del perfilómetro (M2 vs M3).

Uso de suelo	Tratamiento	Repeticiones	Tasa de erosión	
			t ha^{-1} $año^{-1}$	
Pecuario	Suelo desnudo	3	1.08	A
	Barbecho	3	-0.63	A
Agrícola	Suelo desnudo	3	-1.24	A
	Barbecho	3	2.76	A

Prueba de Tukey ($P < 0.05$). Medias que no comparten letra son significativamente diferentes.

En las siguientes imágenes, se ejemplifica gráficamente el micro relieve del suelo en las camas de sedimentación para el tratamiento de barbecho del área agrícola para cada una de sus repeticiones, así como la dirección del flujo del agua a lo largo y ancho de las parcelas experimentales, apreciándose cambios en la rugosidad en los diferentes momentos muestreados, en la figura 29 se muestra el momento 1 (abril del 2018), el momento 2 se muestra en la figura 30 (noviembre del 2018) y momento tres se muestra en la figura 31 (agosto del 2019). Por otra parte, el agua toma diferentes direcciones con base en la rugosidad de la superficie.

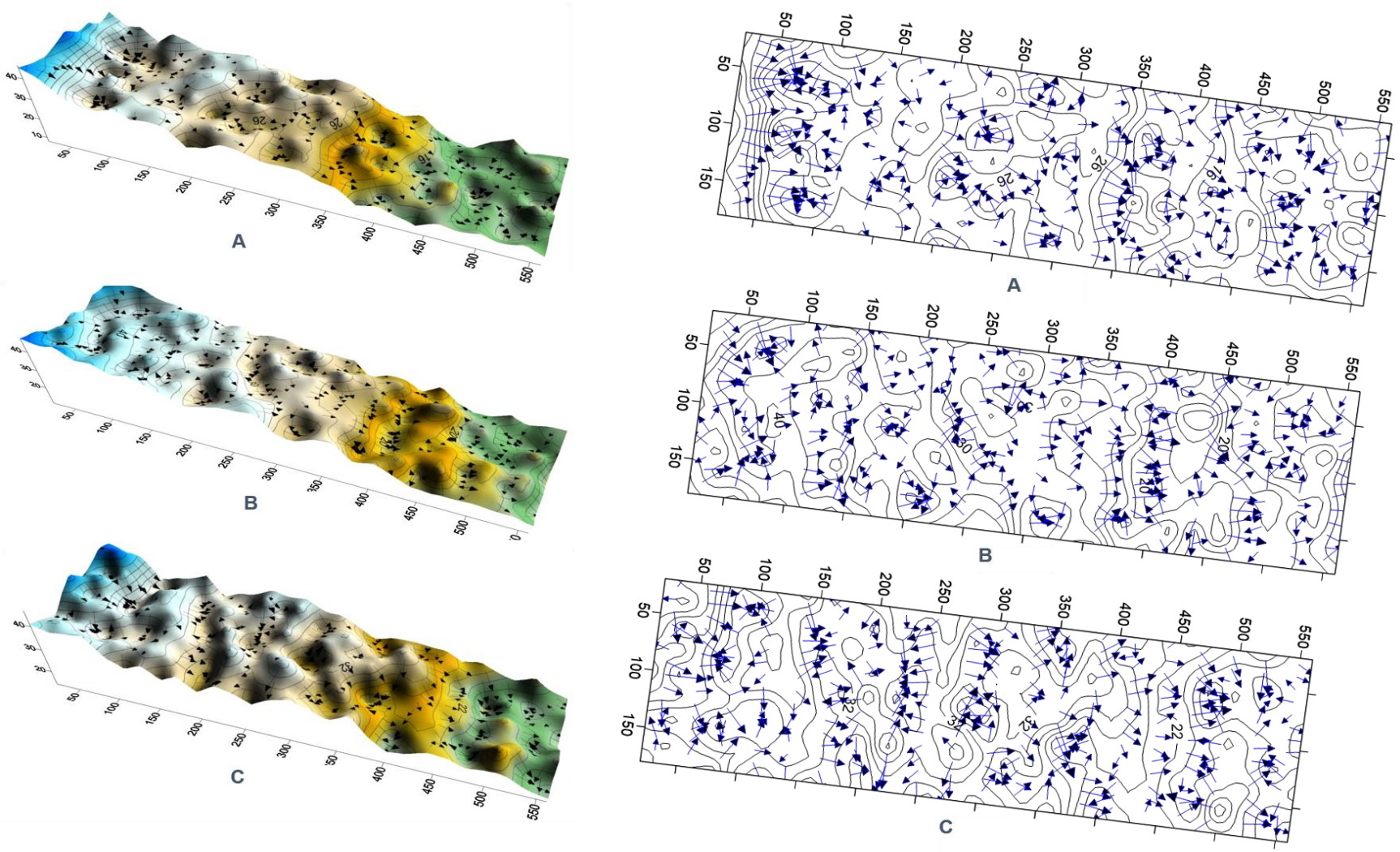


Figura 29. Representación gráfica del micro relieve en el tratamiento barbecho del área agrícola en el momento 1 (M1).

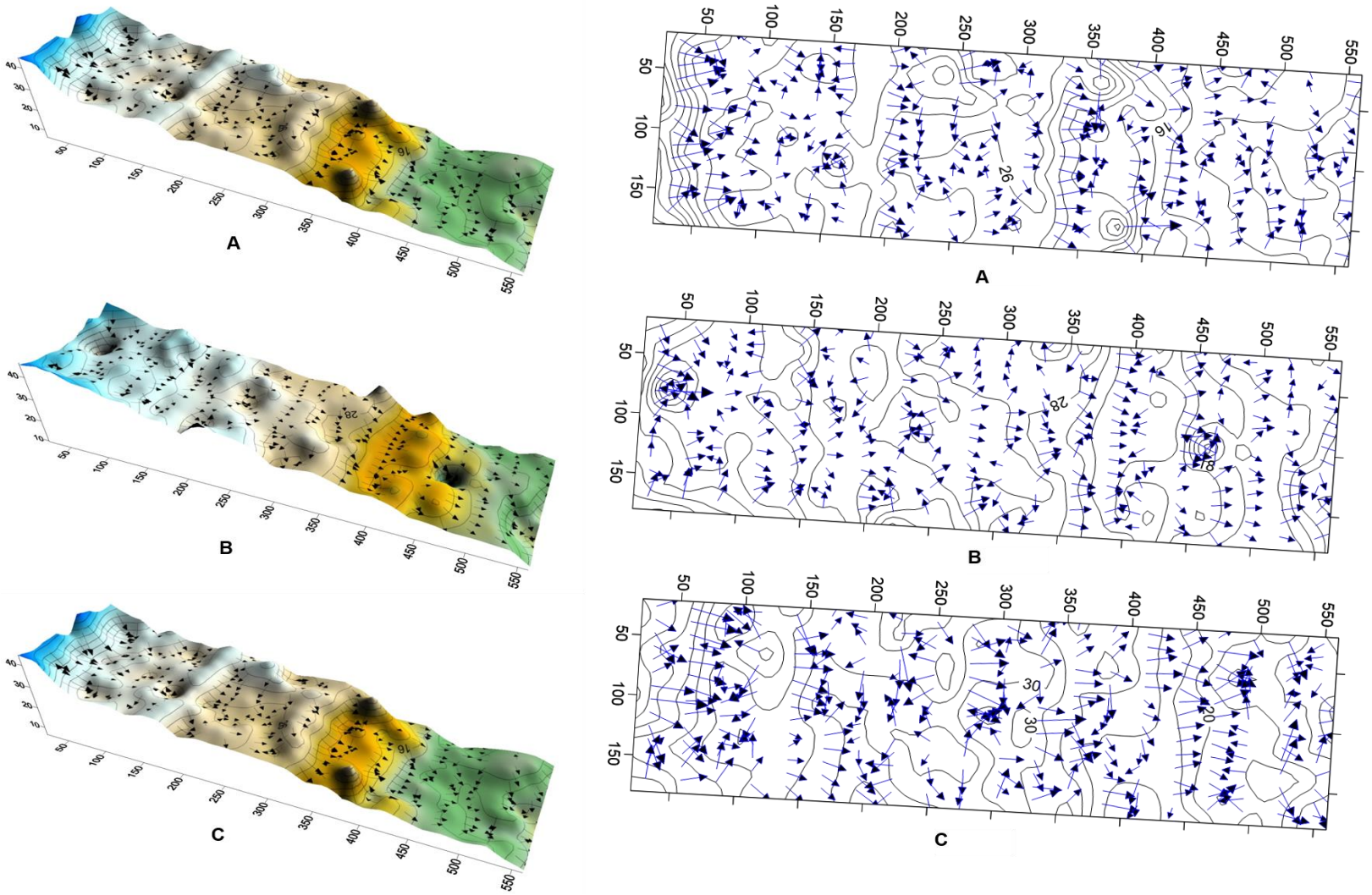


Figura 30. Representación gráfica del micro relieve en el tratamiento barbecho del área agrícola en el momento 2 (M2).

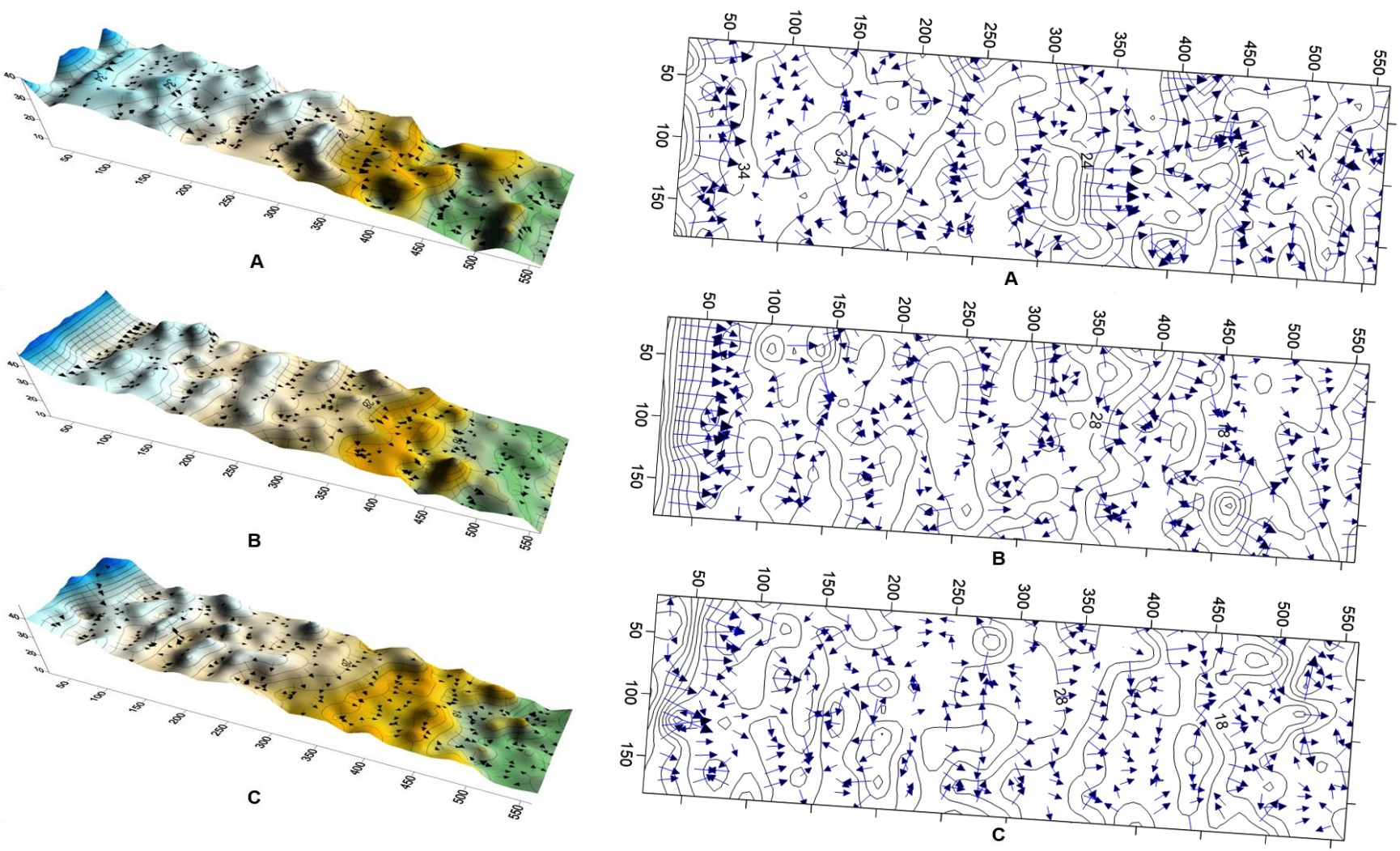


Figura 31. Representación gráfica del micro relieve en el tratamiento barbecho del área agrícola en el momento 3 (M3).

A continuación, se muestran las gráficas correspondientes al tratamiento de suelo desnudo para cada una de sus repeticiones del área agrícola, en los tres momentos de muestreo (figuras 32, 33 y 34) en la que se aprecia un sentido de flujo del agua más homogéneo que en el tratamiento barbecho, así como los cambios sobre la rugosidad del terreno a través del tiempo (M1, M2 Y M3).

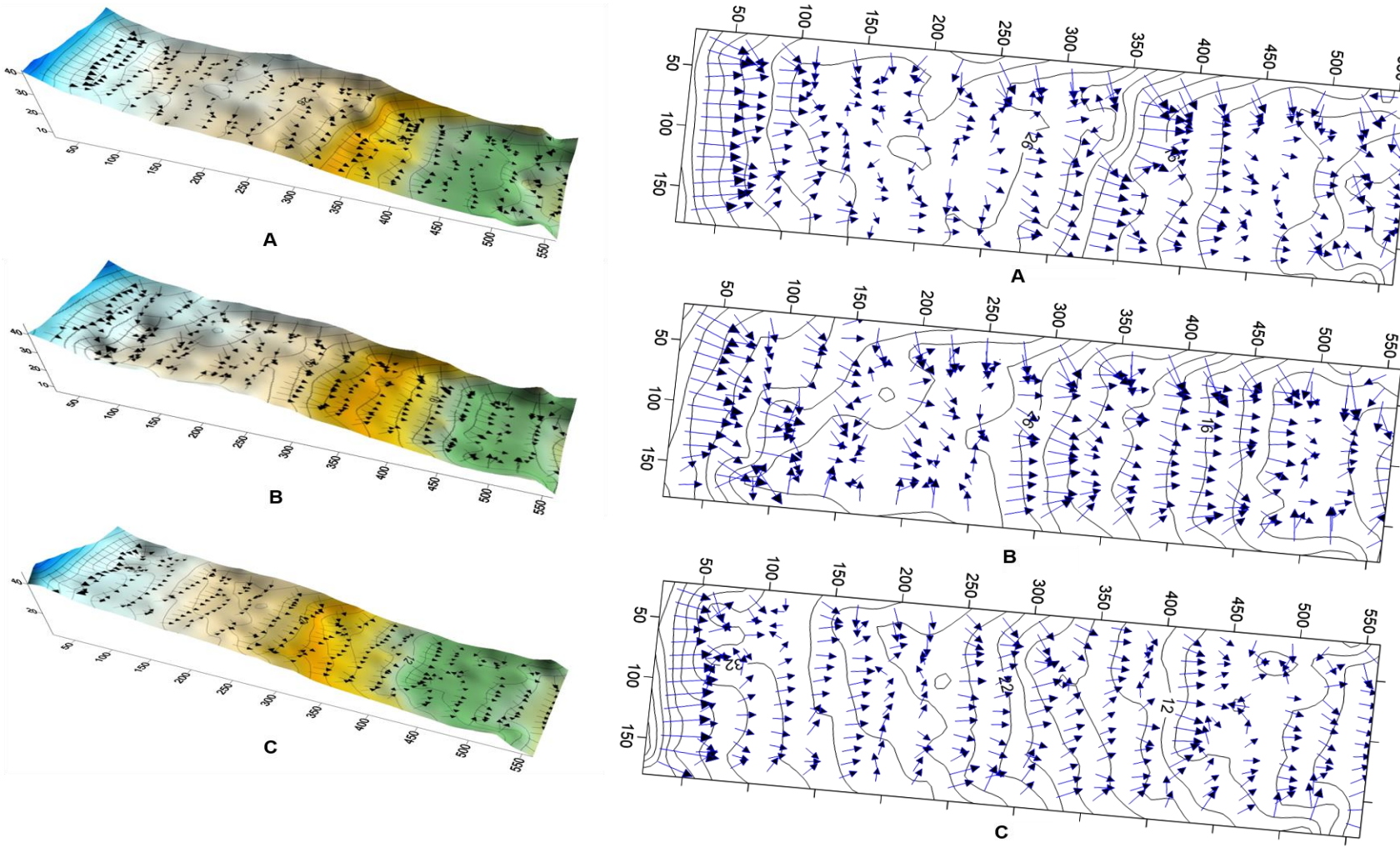


Figura 32. Representación gráfica del micro relieve en el tratamiento suelo desnudo del área agrícola en el momento 1 (M1).

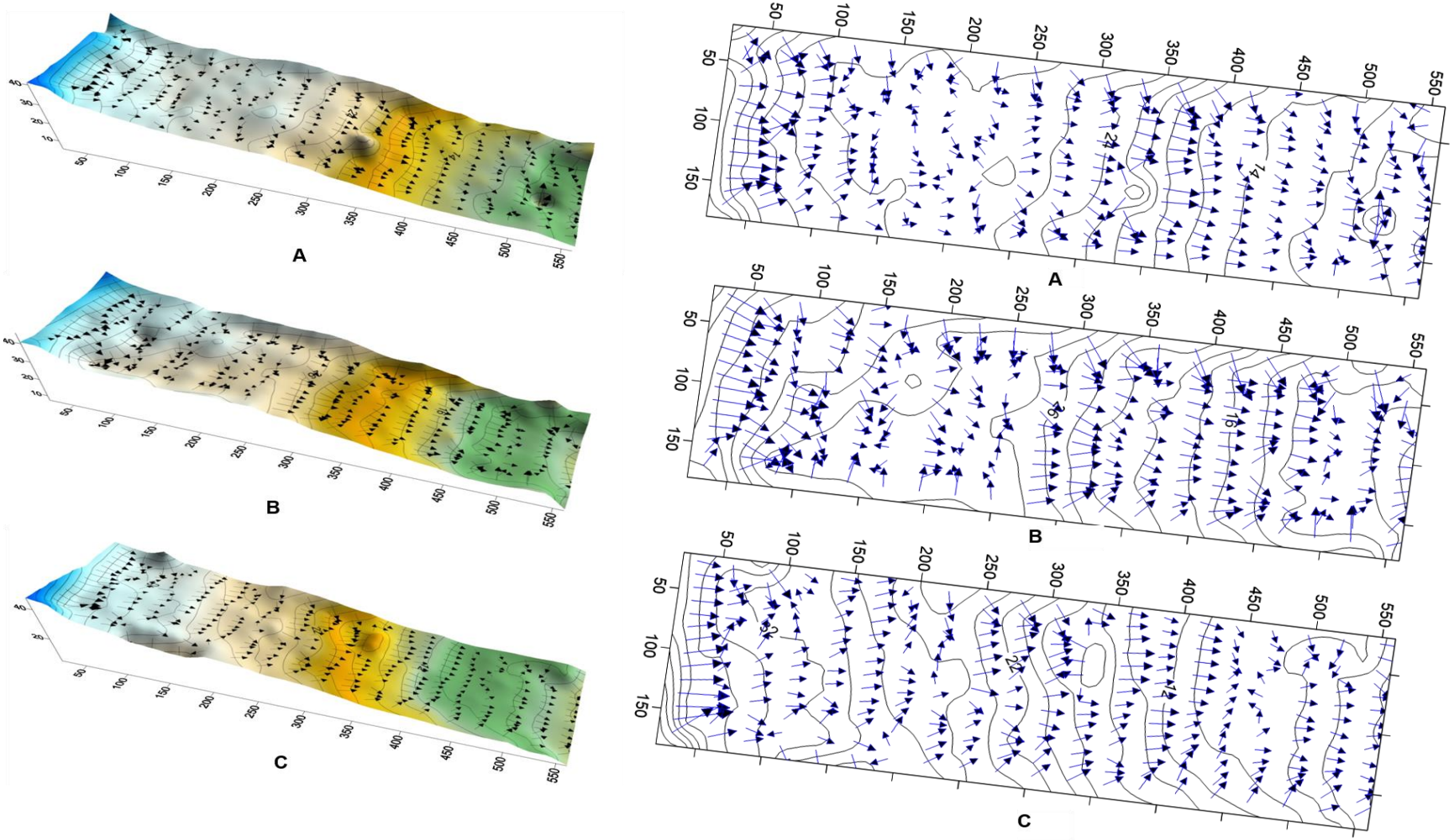


Figura 33. Representación gráfica del micro relieve en el tratamiento suelo desnudo del área agrícola en el momento 2 (M2).

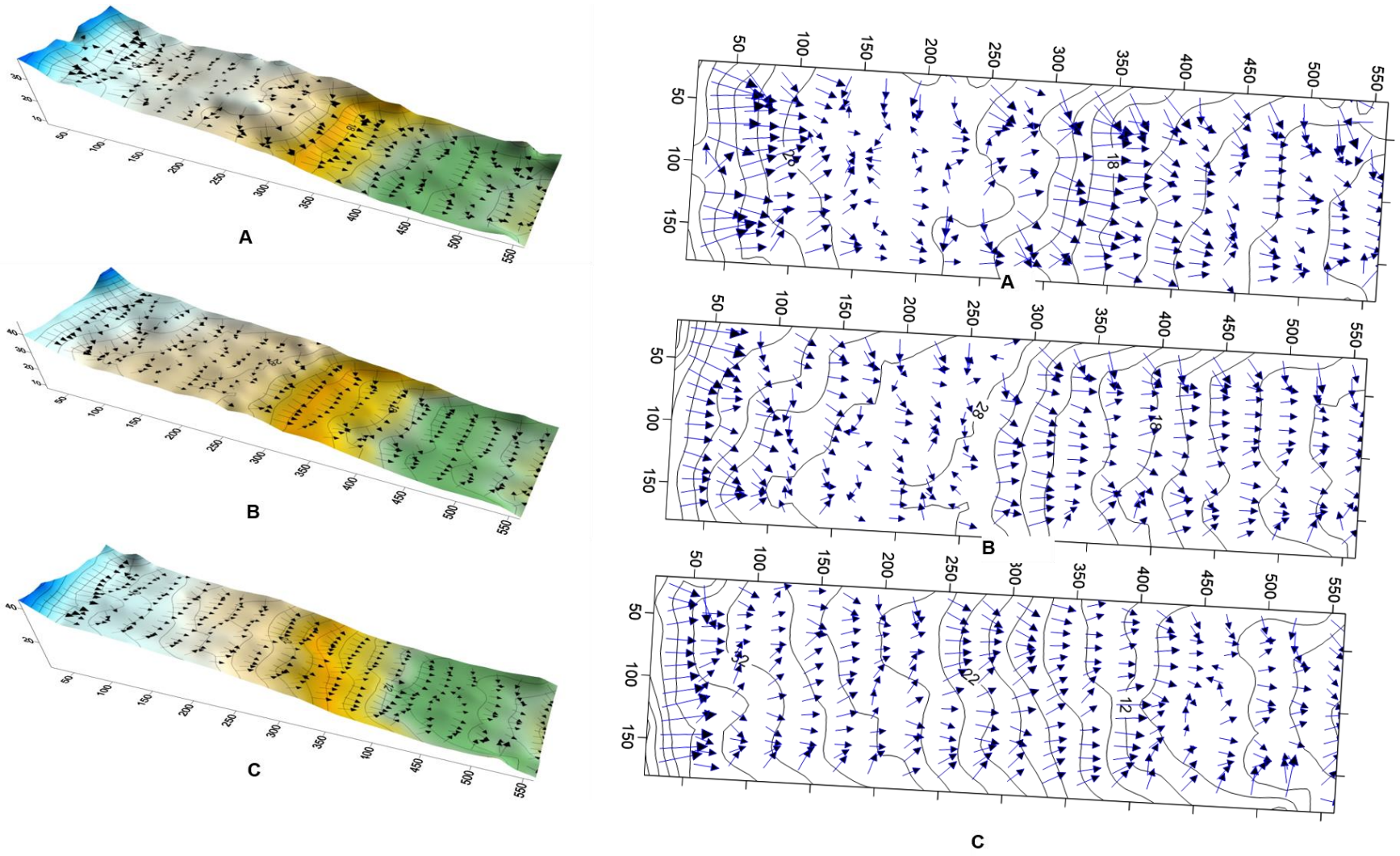


Figura 34. Representación gráfica del micro relieve en el tratamiento suelo desnudo del área agrícola en el momento 3 (M3).

De la misma manera se realizó representación gráfica para el caso del área pecuaria, en las figuras 35, 36 y 37, se muestra el tratamiento del área antes mencionada para el tratamiento barbecho, así como cada una de sus repeticiones. En las cuales, se aprecian los cambios sobre la superficie del suelo que ocurrieron en los tres momentos (M1, M2 y M3) de muestreo y los diferentes sentidos de flujo que toma el agua sobre las parcelas de experimentación.

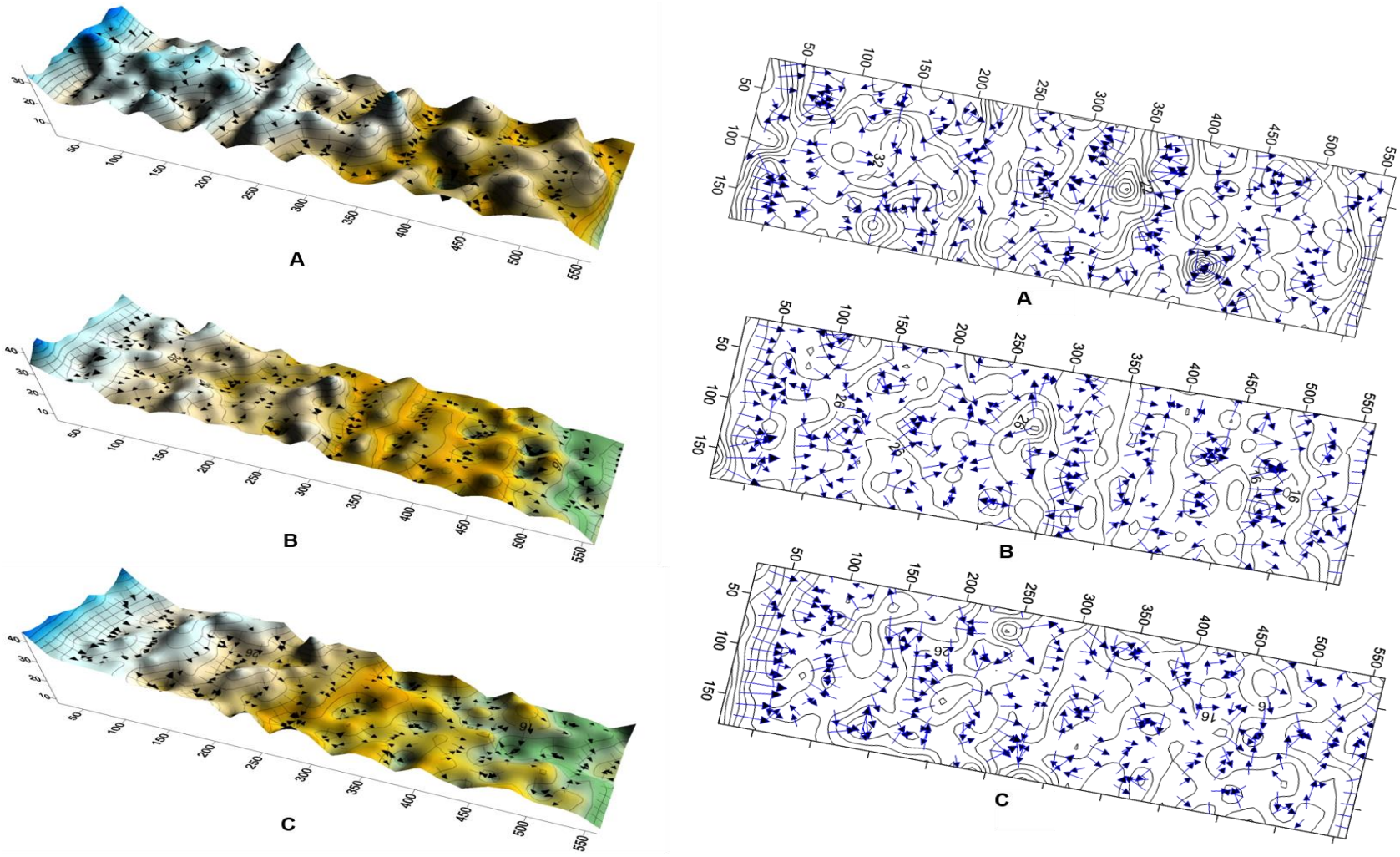


Figura 35. Representación gráfica del micro relieve en el tratamiento barbecho del área pecuaria en el momento 1 (M1).

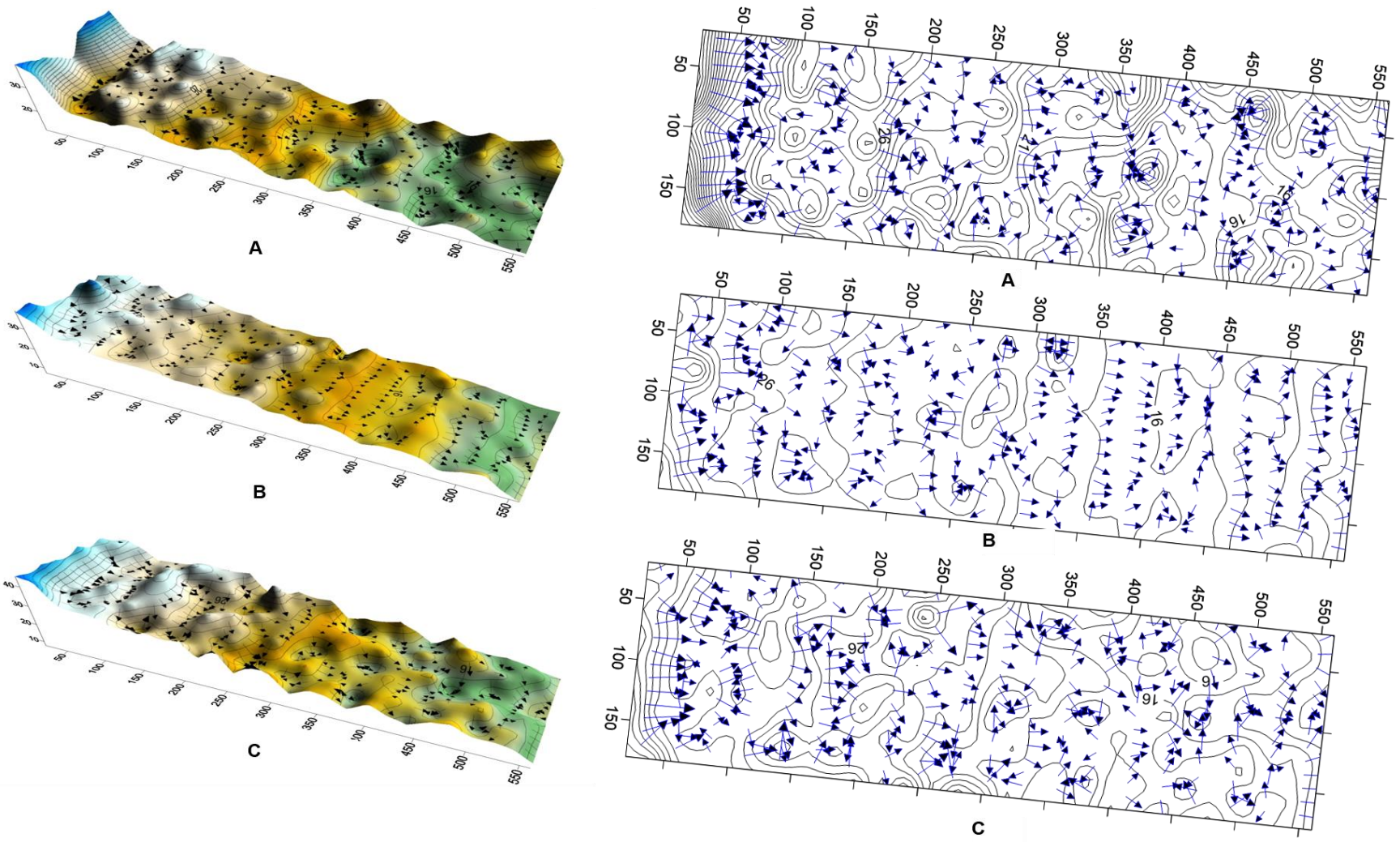


Figura 36. Representación gráfica del micro relieve en el tratamiento barbecho del área pecuaria en el momento 2 (M2).

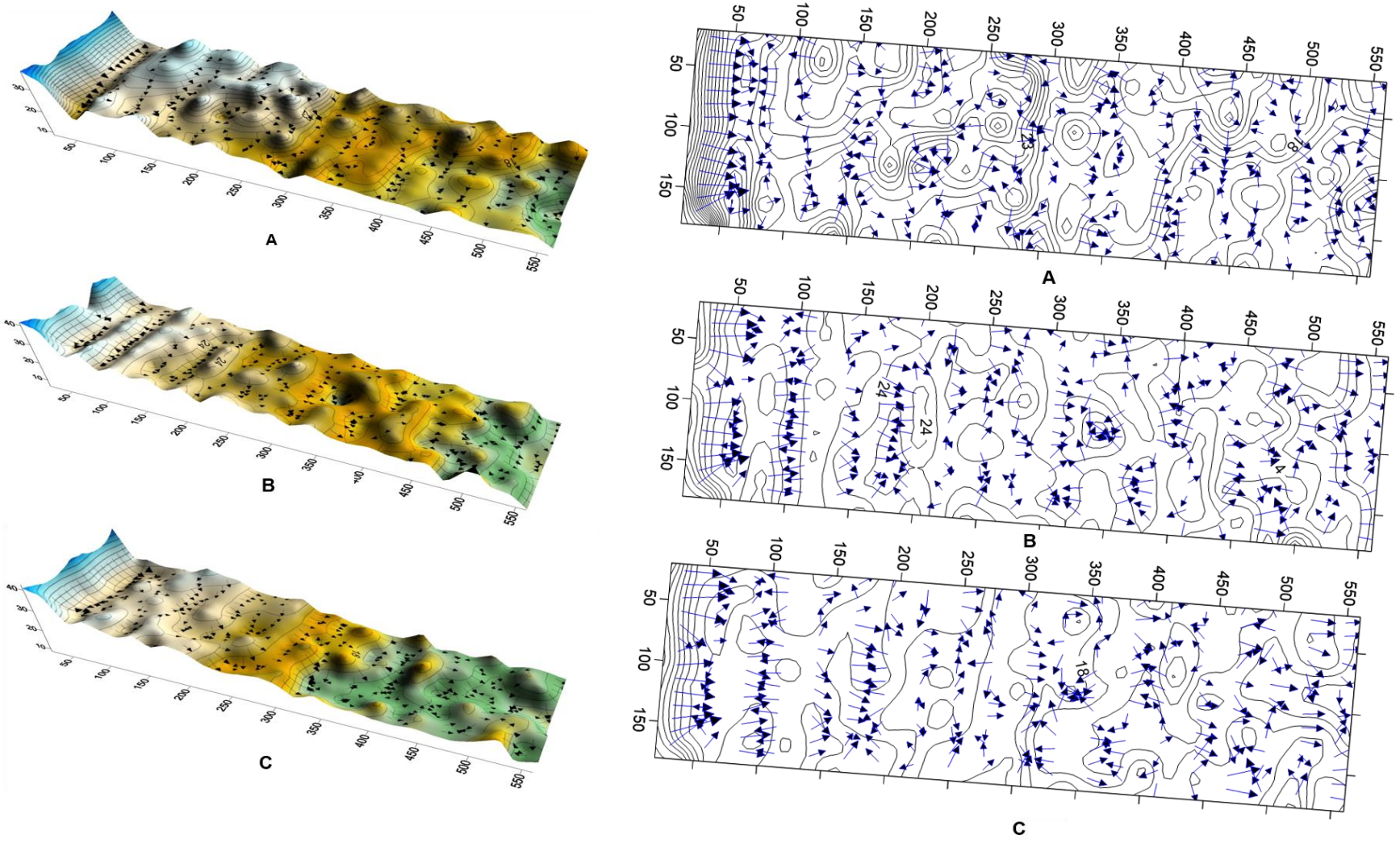


Figura 37. Representación gráfica del micro relieve en el tratamiento barbecho del área pecuaria en el momento 3 (M3).

Por otra parte, en cuanto al tratamiento de suelo desnudo del área pecuaria, a continuación, en las figuras 38, 39 y 40 Se muestran gráficamente cada uno de los momentos muestreados (M1, M2 y M3), en los que se aprecia un sentido del flujo de agua homogéneo en cada una de las repeticiones para los tres momentos, además se aprecian los cambios que se presentaron haciendo comparación de un momento respecto de otro.

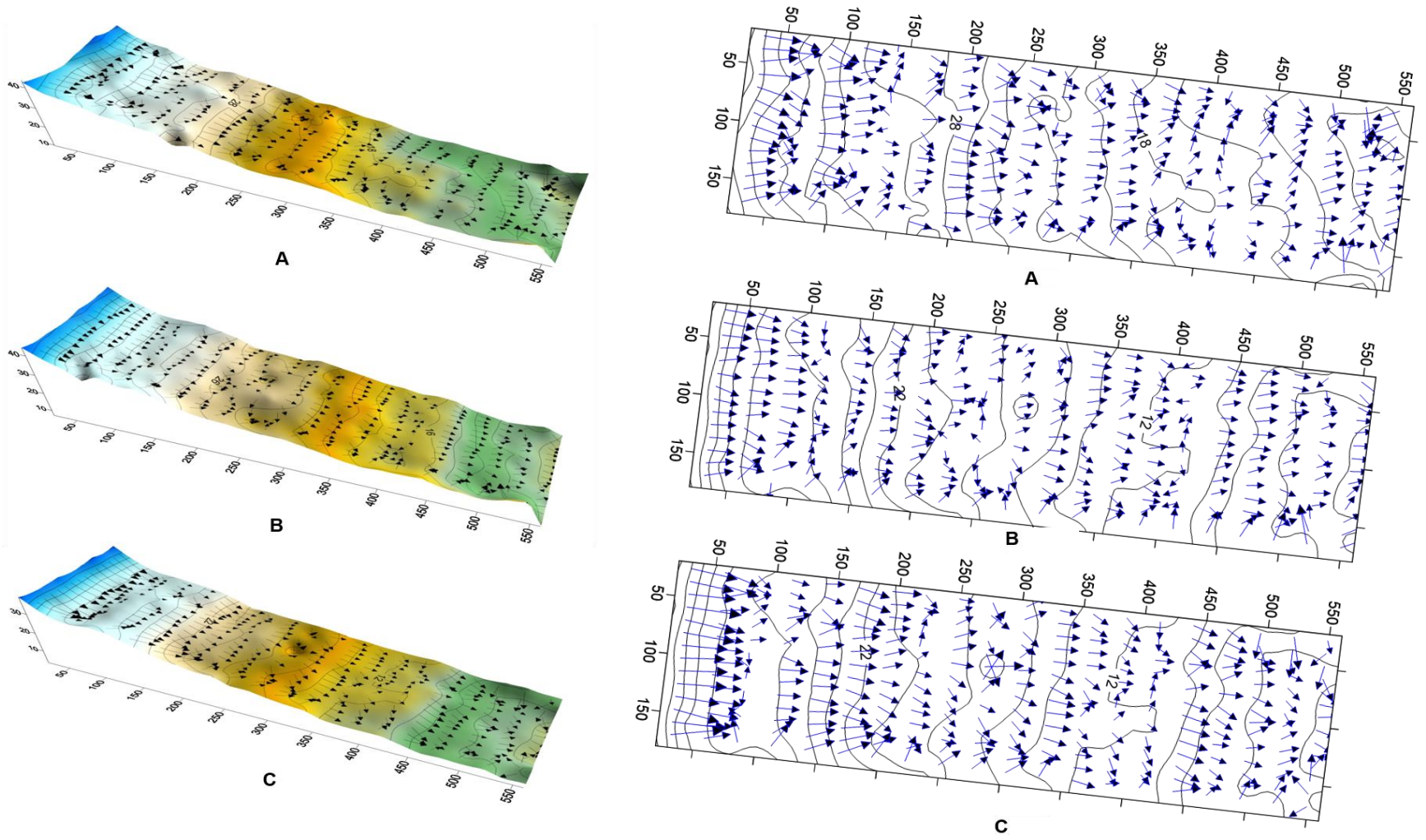


Figura 38. Representación gráfica del micro relieve en el tratamiento suelo desnudo del área pecuaria en el momento 1 (M1).

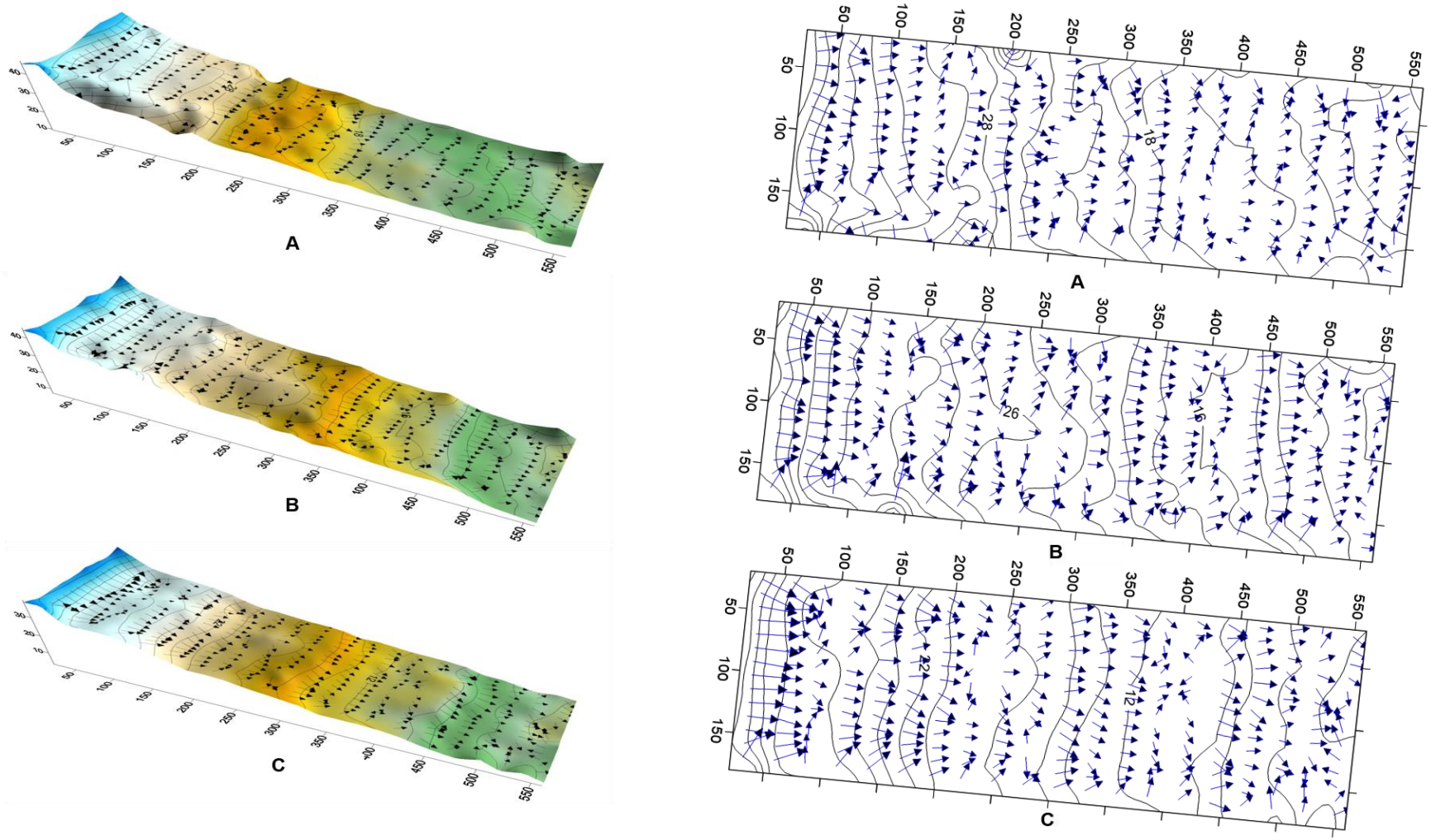


Figura 39. Representación gráfica del micro relieve en el tratamiento suelo desnudo del área pecuaria en el momento 2 (M2).

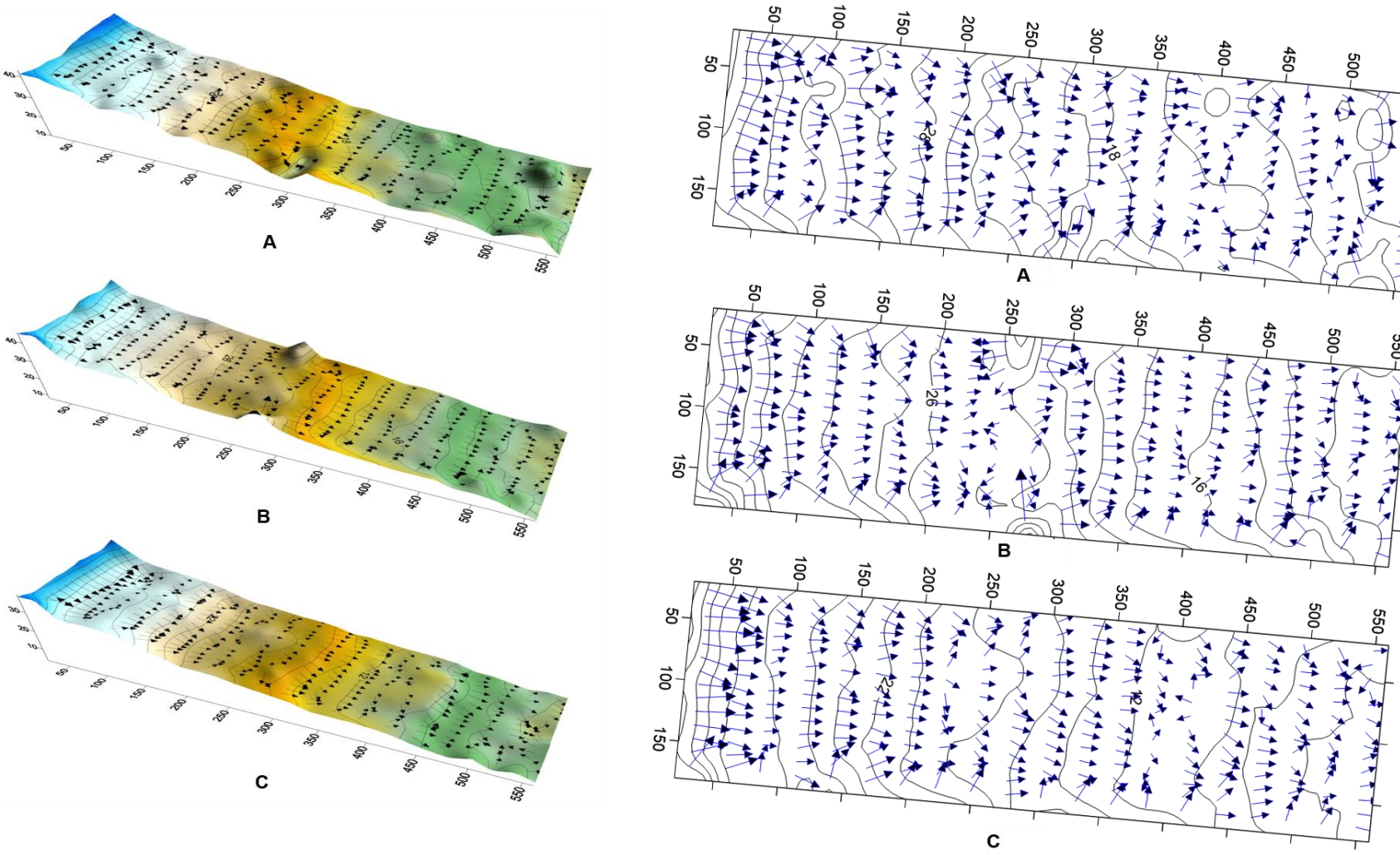


Figura 40. Representación gráfica del micro relieve en el tratamiento suelo desnudo del área pecuaria en el momento 3 (M3).

A continuación, se muestra gráficamente el comportamiento del microrrelieve en las camas experimentales de sedimentación para los tratamientos de barbecho (figuras 41, 42 y 43) y suelo desnudo (figuras 44, 45 y 46) en la unidad experimental del área agrícola para cada una de sus tres repeticiones, así como la distribución de los puntos muestreados con el perfilómetro sobre la superficie de las camas experimentales con muestreo en dos momentos, el primero en abril del 2018 (M1) y el segundo en noviembre de 2018 (M2). Para lo cual, en las tres repeticiones los resultados obtenidos para la medición del momento 1 se obtuvieron alturas mayores en comparación con el momento 2.

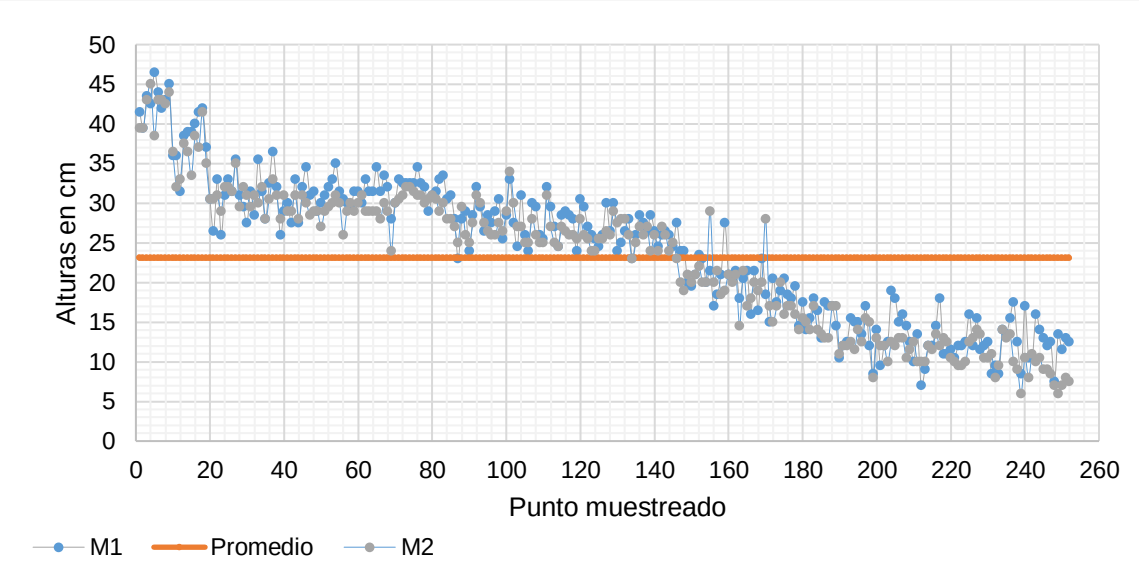


Figura 41. Representación gráfica de las alturas medidas en dos momentos de muestreo (M1 y M2) en el tratamiento de Barbecho repetición 1 en el área agrícola.

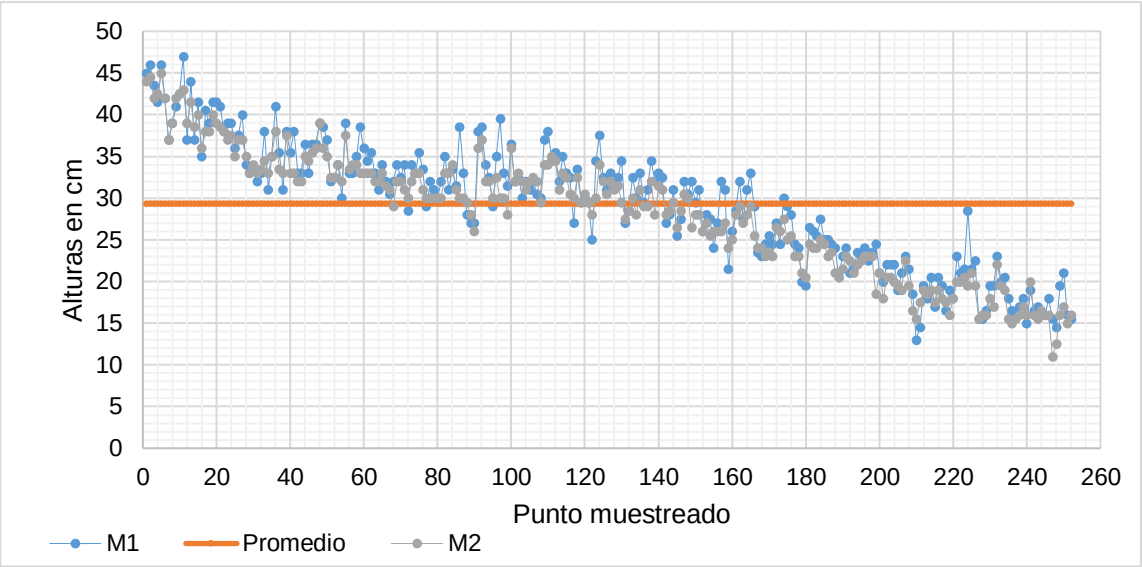


Figura 42. Representación gráfica de las alturas medidas en dos momentos de muestreo (M1 y M2) en el tratamiento de Barbecho repetición 2 en el área agrícola.

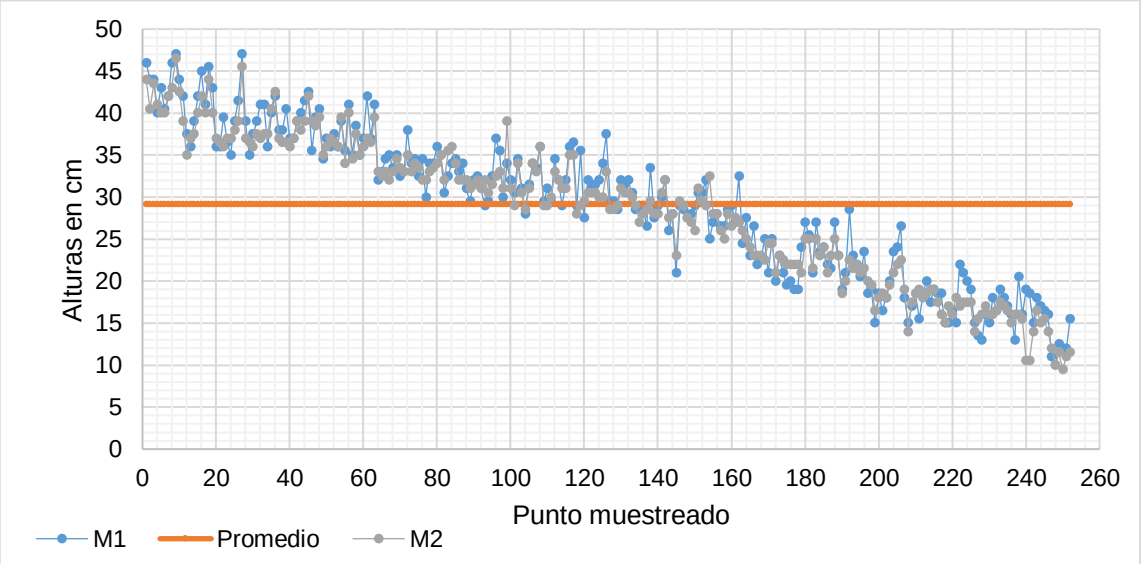


Figura 43. Representación gráfica de las alturas medidas en dos momentos de muestreo (M1 y M2) en el tratamiento de Barbecho repetición 3 en el área agrícola.

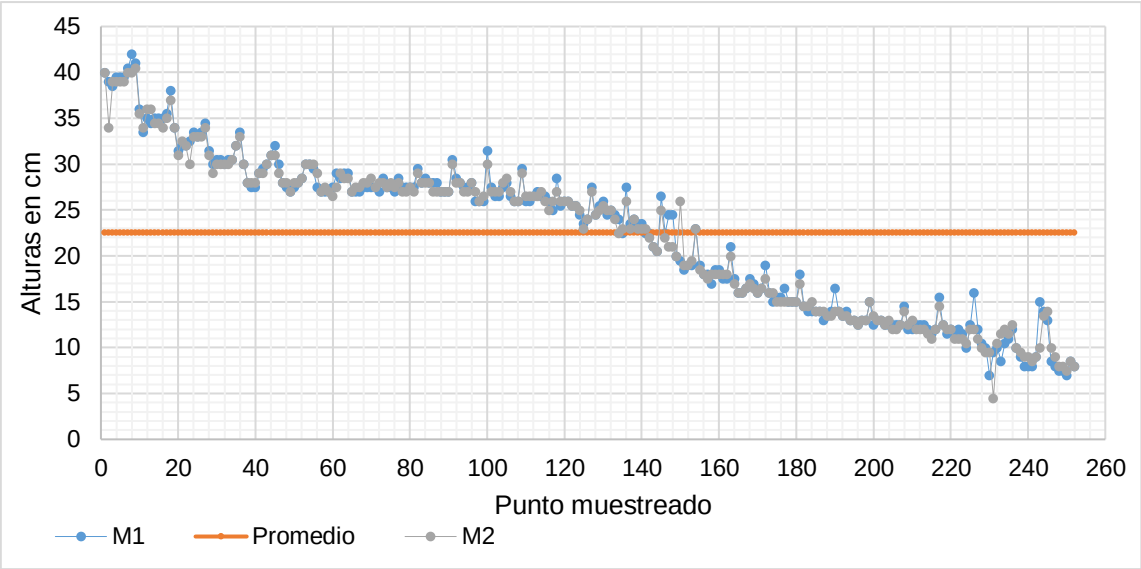


Figura 44. Representación gráfica de las alturas medidas en dos momentos de muestreo (M1 y M2) en el tratamiento Suelo Desnudo repetición 1 en el área agrícola.

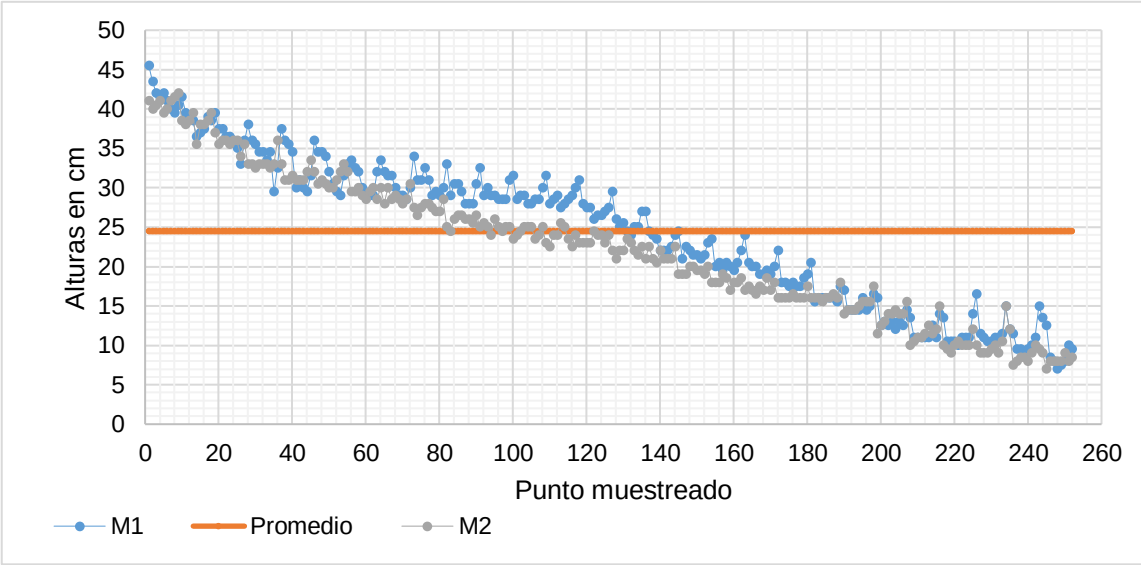


Figura 45. Representación gráfica de las alturas medidas en dos momentos de muestreo (M1 y M2) en el tratamiento Suelo Desnudo repetición 2 en el área agrícola.

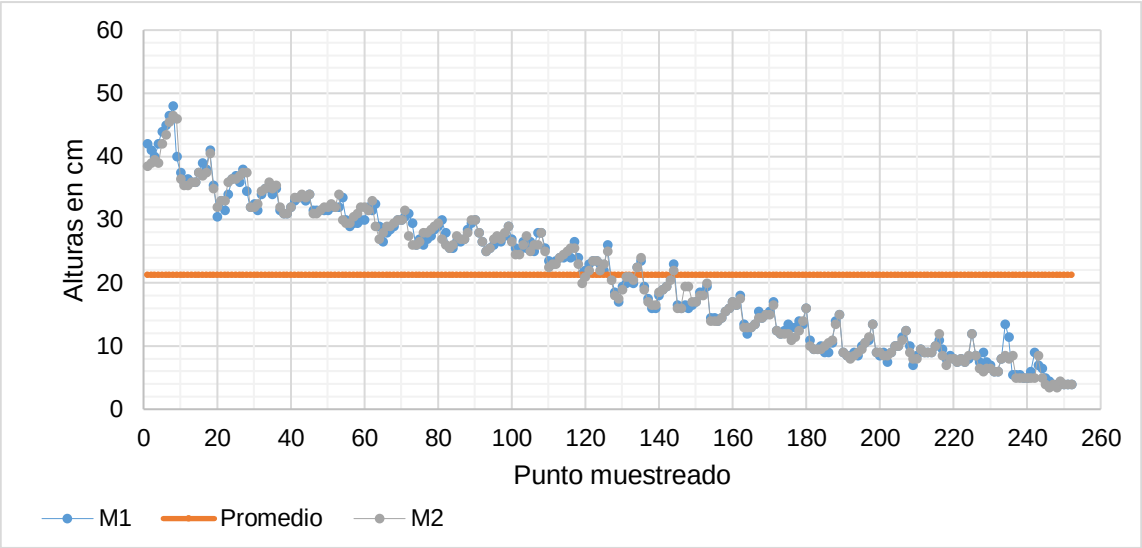


Figura 46. Representación gráfica de las alturas medidas en dos momentos de muestreo (M1 y M2) en el tratamiento Suelo Desnudo repetición 3 en el área agrícola.

Enseguida se muestra el comportamiento y distribución de los puntos muestreados para los tratamientos barbecho con sus tres repeticiones (figuras 47, 48 y 49 respectivamente) y del mismo modo en las tres repeticiones del suelo desnudo del área agrícola (figuras 50, 51 y 52 respectivamente), en este caso, comparando los momentos de muestreo M2 (noviembre de 2018) y M3 (agosto de 2019), en el tratamiento barbecho, se obtuvieron mayores alturas en la repetición 1 en el momento 2, mientras que en las repeticiones 2 y 3 se obtuvieron mayores alturas en el momento 3. Por otro lado, en el tratamiento suelo desnudo se obtuvieron mayores alturas en las repeticiones 1 y 3 del momento 2, mientras que en el momento 3 presentó mayores alturas en la repetición 2.

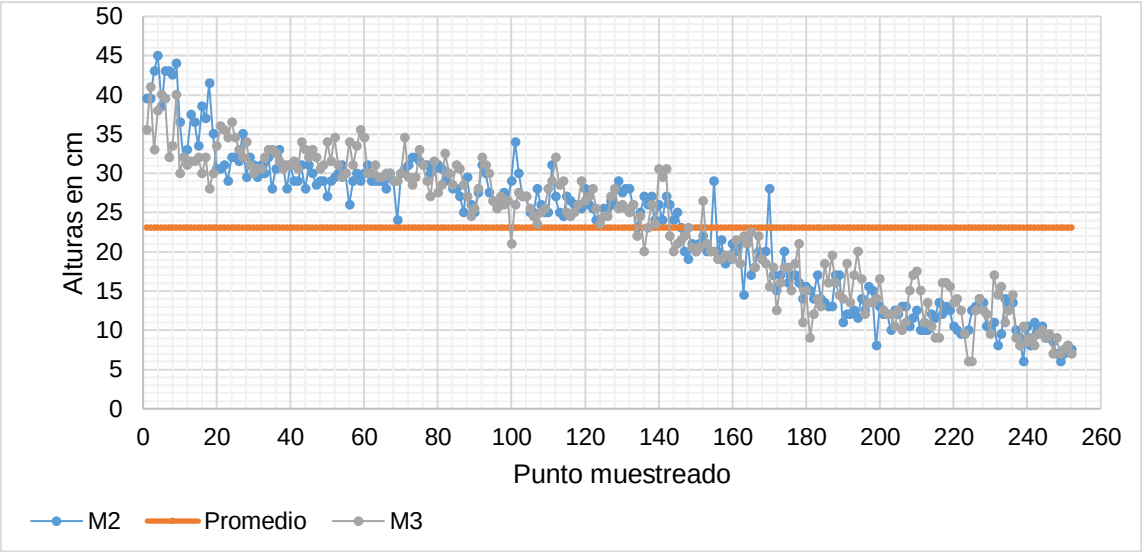


Figura 47. Representación gráfica de las alturas medidas en dos momentos de muestreo (M2 y M3) en el tratamiento de Barbecho repetición 1 en el área agrícola.

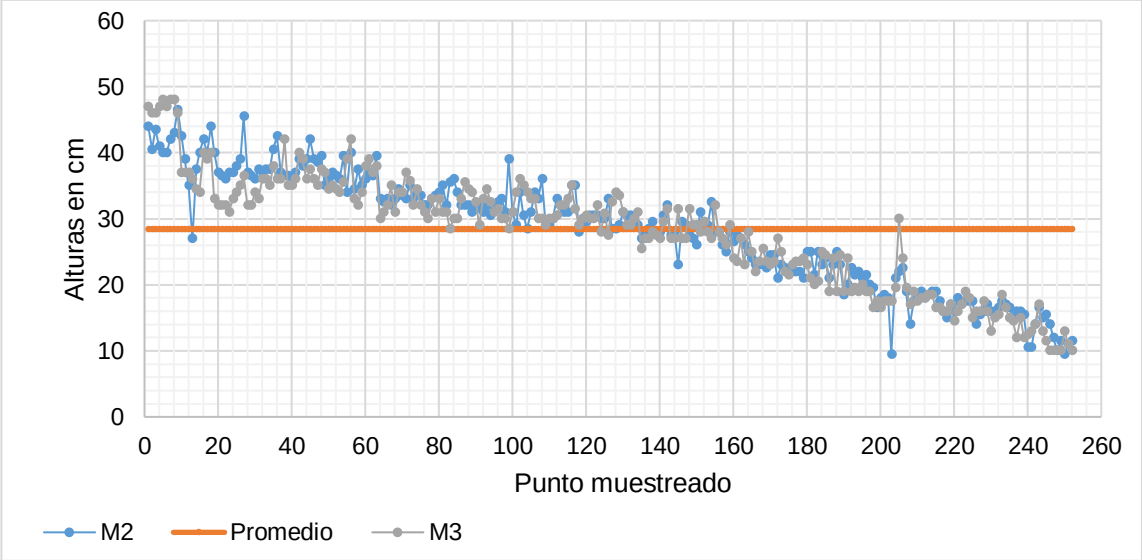


Figura 48. Representación gráfica de las alturas medidas en dos momentos de muestreo (M2 y M3) en el tratamiento de Barbecho repetición 2 en el área agrícola.

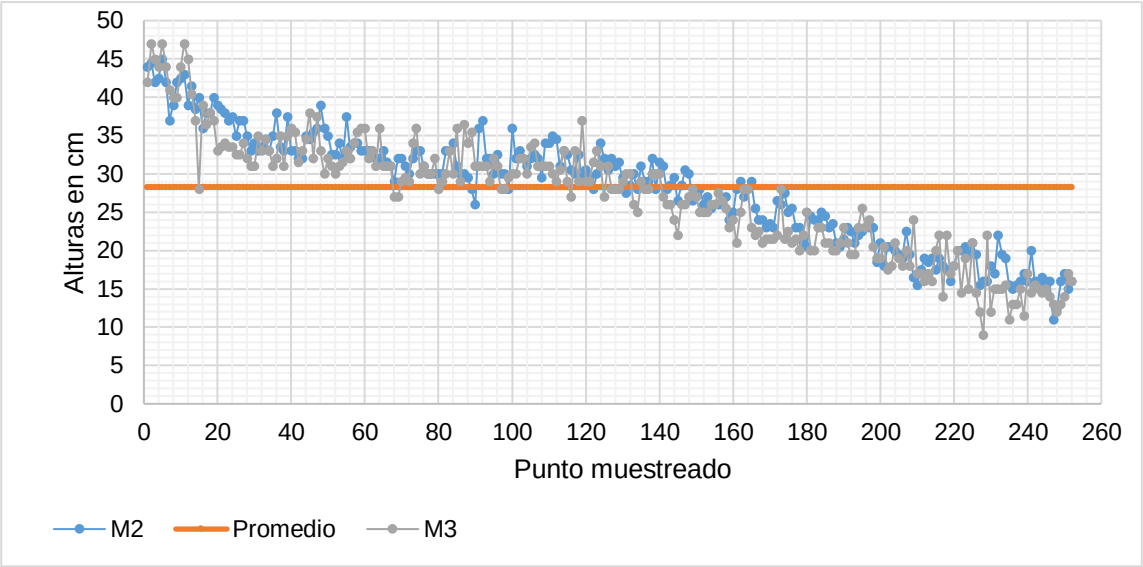


Figura 49. Representación gráfica de las alturas medidas en dos momentos de muestreo (M2 y M3) en el tratamiento de Barbecho repetición 3 en el área agrícola.

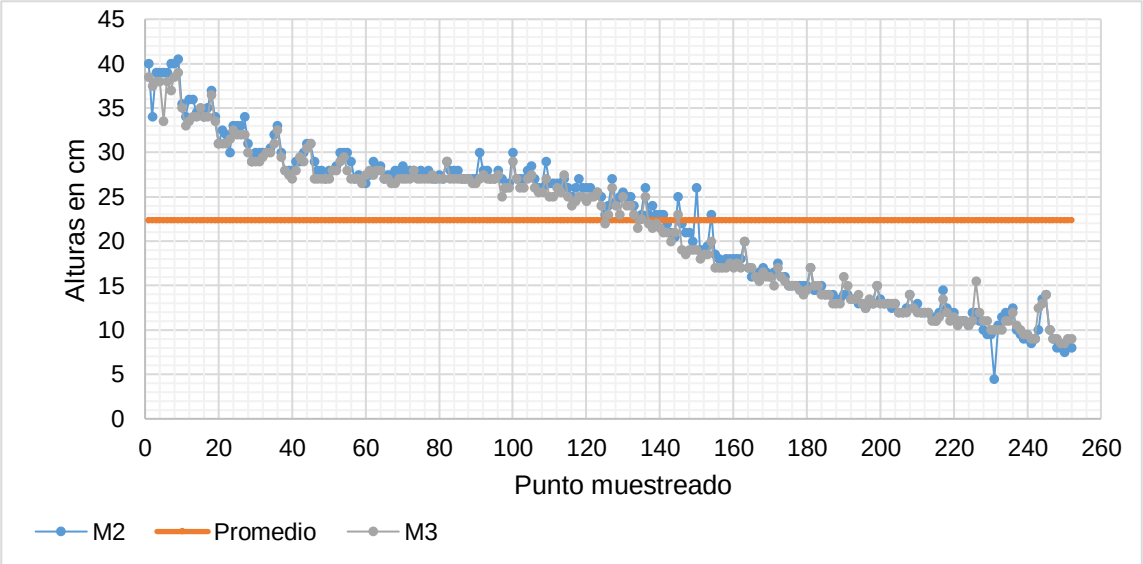


Figura 50. Representación gráfica de las alturas medidas en dos momentos de muestreo (M2 y M3) en el tratamiento Suelo Desnudo repetición 1 en el área agrícola.

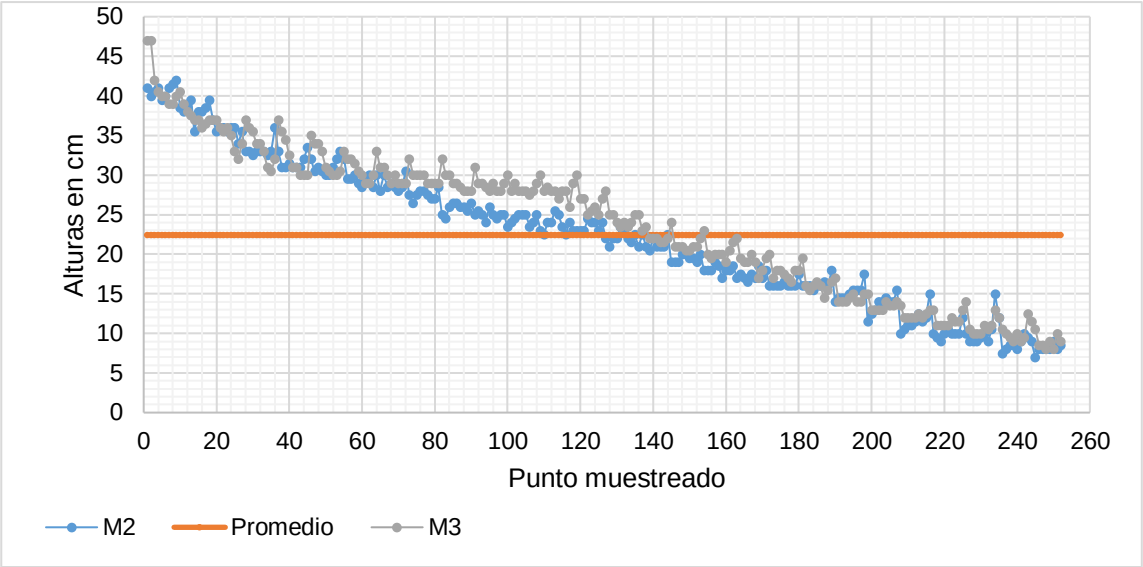


Figura 51. Representación gráfica de las alturas medidas en dos momentos de muestreo (M2 y M3) en el tratamiento Suelo Desnudo repetición 2 en el área agrícola.

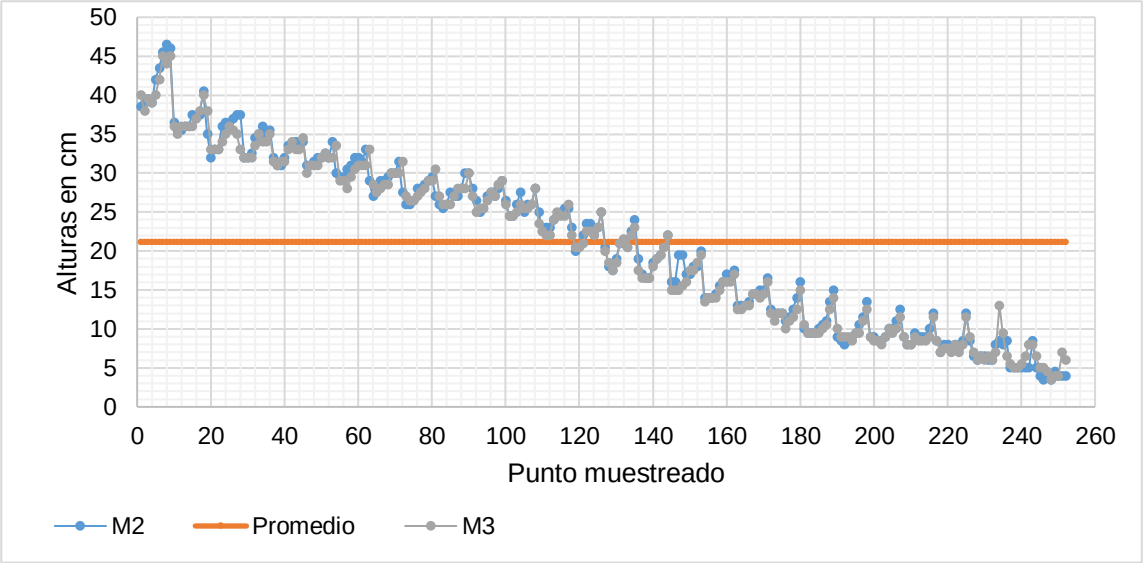
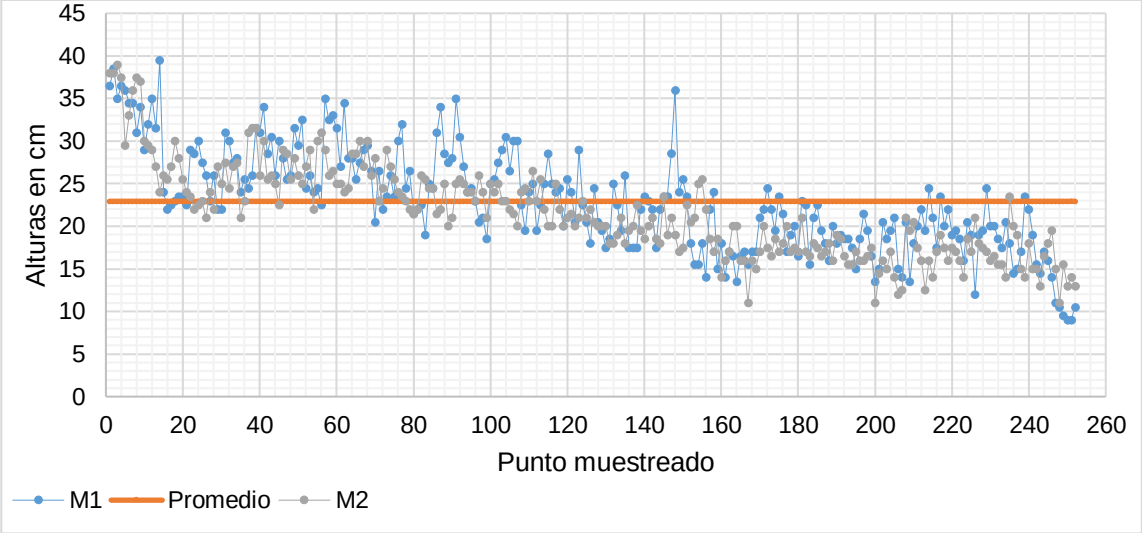


Figura 52. Representación gráfica de las alturas medidas en dos momentos de muestreo (M2 y M3) en el tratamiento Suelo Desnudo repetición 3 en el área agrícola.

Por otro lado, en las figuras 53, 54 y 55 Se muestra el comportamiento del microrrelieve en las camas experimentales de sedimentación para el tratamiento barbecho, mientras que en las figuras 56, 57 y 58 se muestran los comportamientos y distribución de los puntos de muestreo en el tratamiento de suelo desnudo en la unidad experimental del área pecuaria. En comparación de

los momentos de muestreo M1 en abril del 2018 y M2 en noviembre de 2018, en los cuales, se obtuvieron mayores alturas en los muestreos realizados en el primer momento respecto al segundo momento.

Figura 53. Representación gráfica de las alturas medidas en dos momentos de muestreo (M1 y M2) en el tratamiento de Barbecho repetición 1 en el área pecuaria.



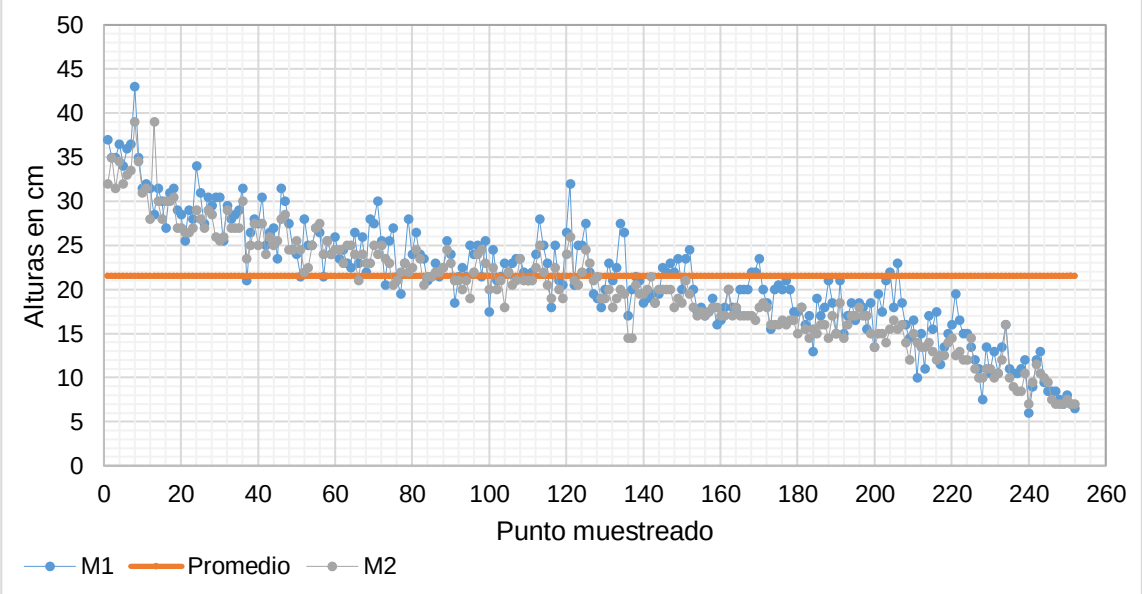


Figura 54. Representación gráfica de las alturas medidas en dos momentos de muestreo (M1 y M2) en el tratamiento de Barbecho repetición 2 en el área pecuaria.

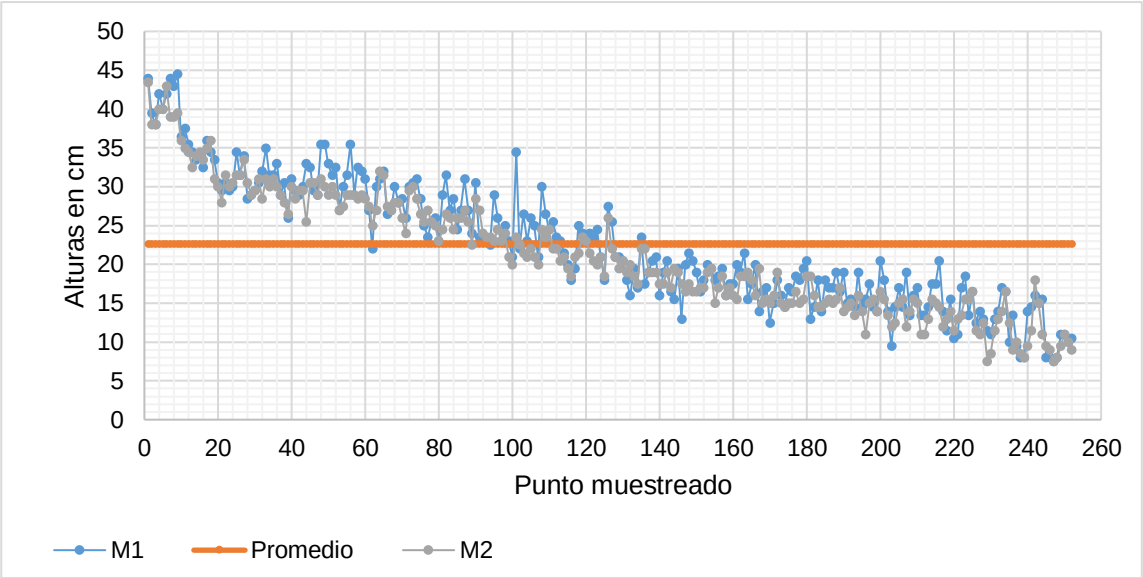


Figura 55. Representación gráfica de las alturas medidas en dos momentos de muestreo (M1 y M2) en el tratamiento de Barbecho repetición 3 en el área pecuaria.

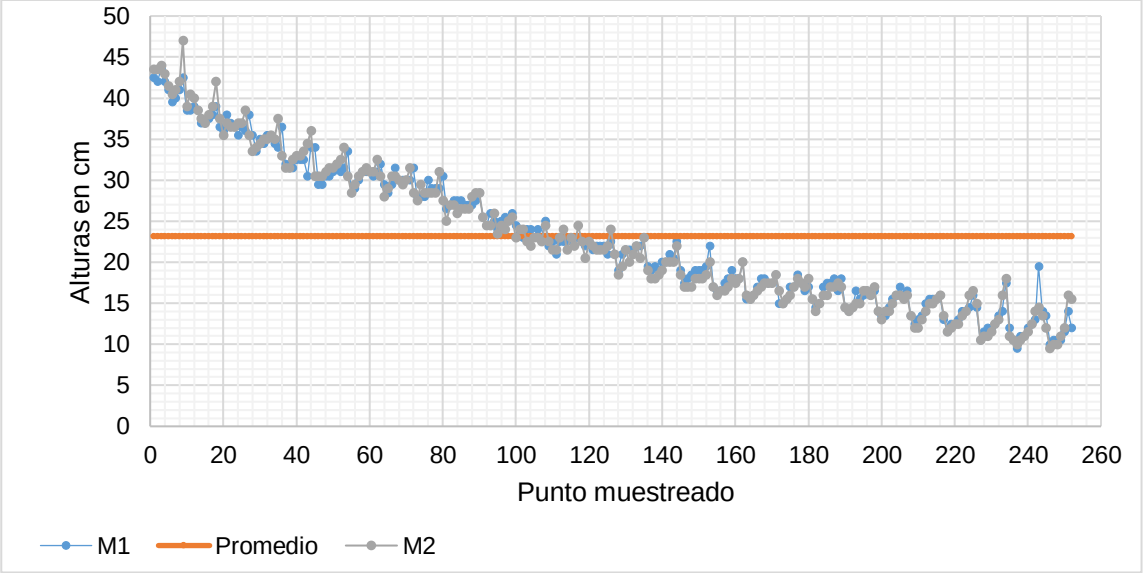


Figura 56. Representación gráfica de las alturas medidas en dos momentos de muestreo (M1 y M2) en el tratamiento Suelo Desnudo repetición 1 en el área pecuaria.

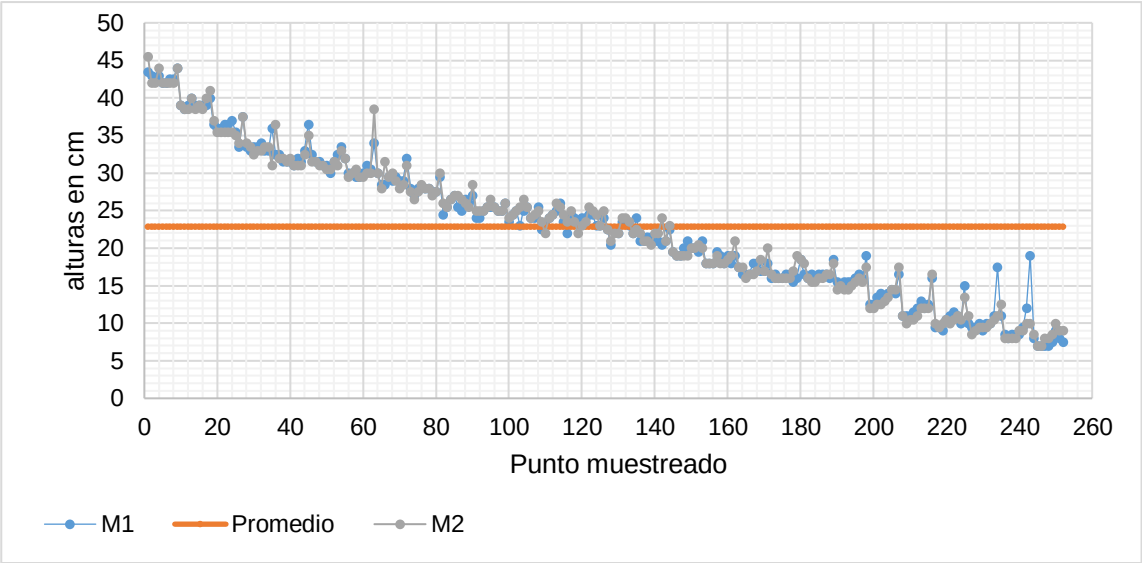


Figura 57. Representación gráfica de las alturas medidas en dos momentos de muestreo (M1 y M2) en el tratamiento Suelo Desnudo repetición 2 en el área pecuaria.

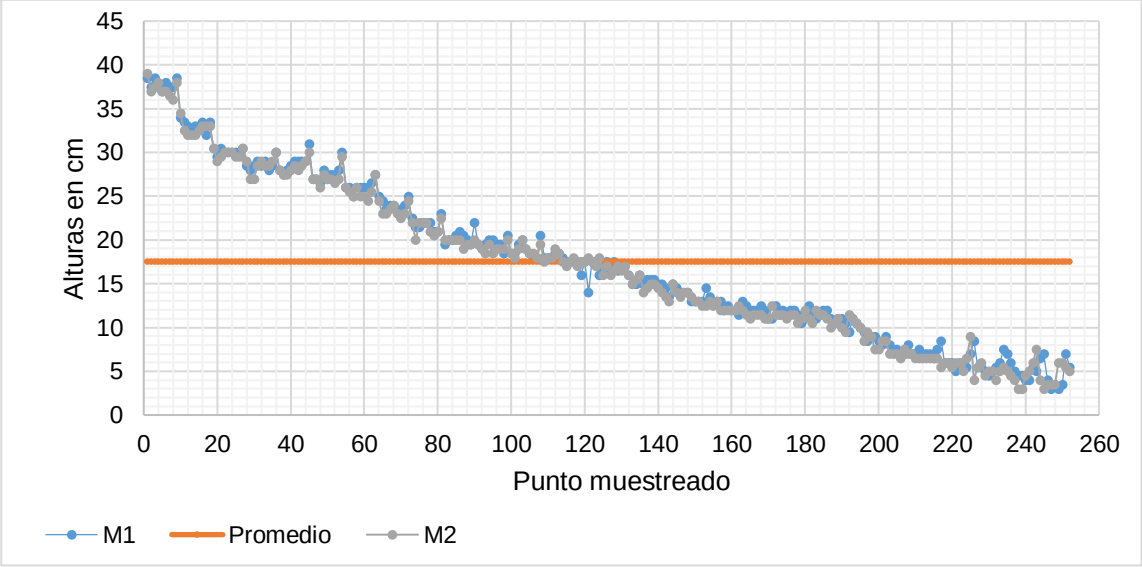


Figura 58. Representación gráfica de las alturas medidas en dos momentos de muestreo (M1 y M2) en el tratamiento Suelo Desnudo repetición 3 en el área pecuaria.

A continuación, en las figuras 59, 60 y 61 se muestran los comportamientos de los puntos muestreados en las repeticiones 1 2 y 3 respectivamente del tratamiento barbecho del área pecuaria, y en las figuras 62, 63 y 64 Las tres repeticiones correspondientes al tratamiento suelo desnudo del área pecuaria. Para ambos tratamientos se comparan los momentos M2 (noviembre de 2018) y

M3 (agosto de 2019), en este caso, para el tratamiento barbecho del momento 2 se obtuvieron alturas mayores en las repeticiones 1 y 2, mientras que en el momento 3 se obtuvieron mayores alturas en la repetición 3. Por otra parte, en el tratamiento suelo desnudo, se obtuvieron mayores alturas en el momento 3 en las repeticiones 1 y 2, mientras que en la repetición 3 las mayores alturas se registraron en el momento 2.

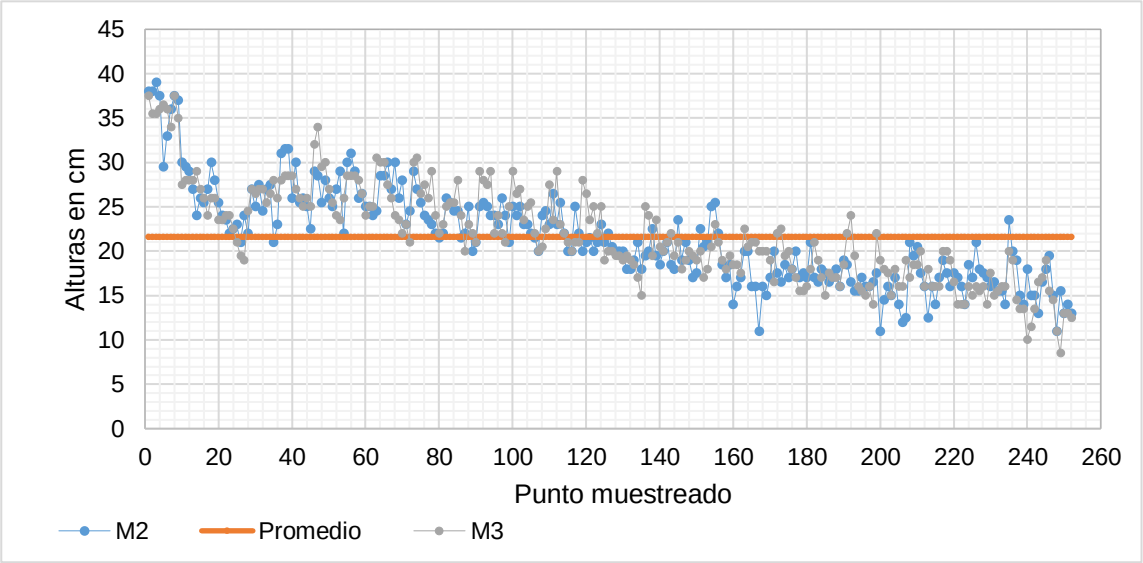


Figura 59. Representación gráfica de las alturas medidas en dos momentos de muestreo (M2 y M3) en el tratamiento de Barbecho repetición 1 en el área pecuaria.

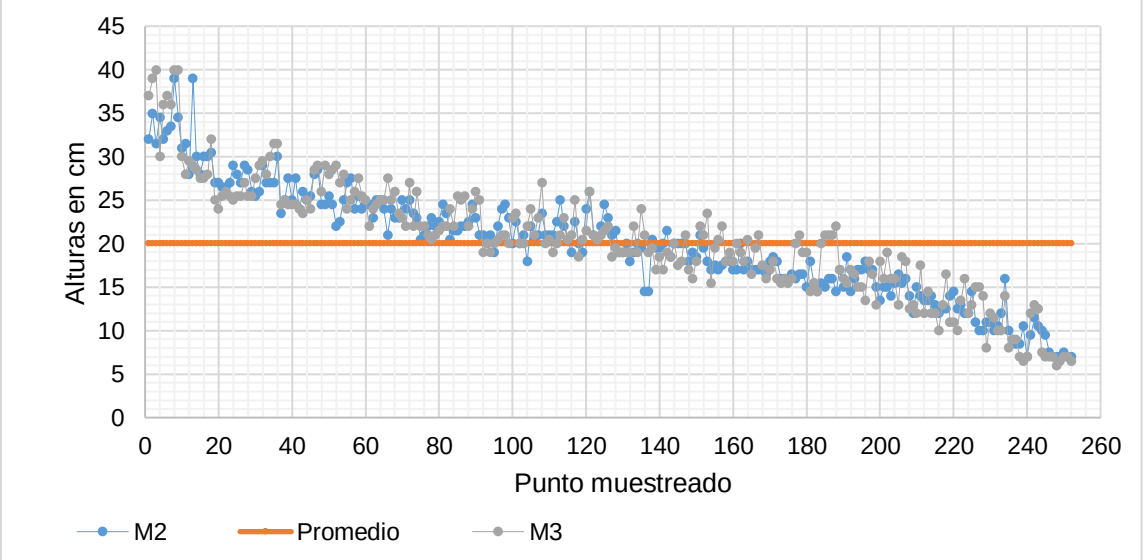


Figura 60. Representación gráfica de las alturas medidas en dos momentos de muestreo (M2 y M3) en el tratamiento de Barbecho repetición 2 en el área pecuaria.

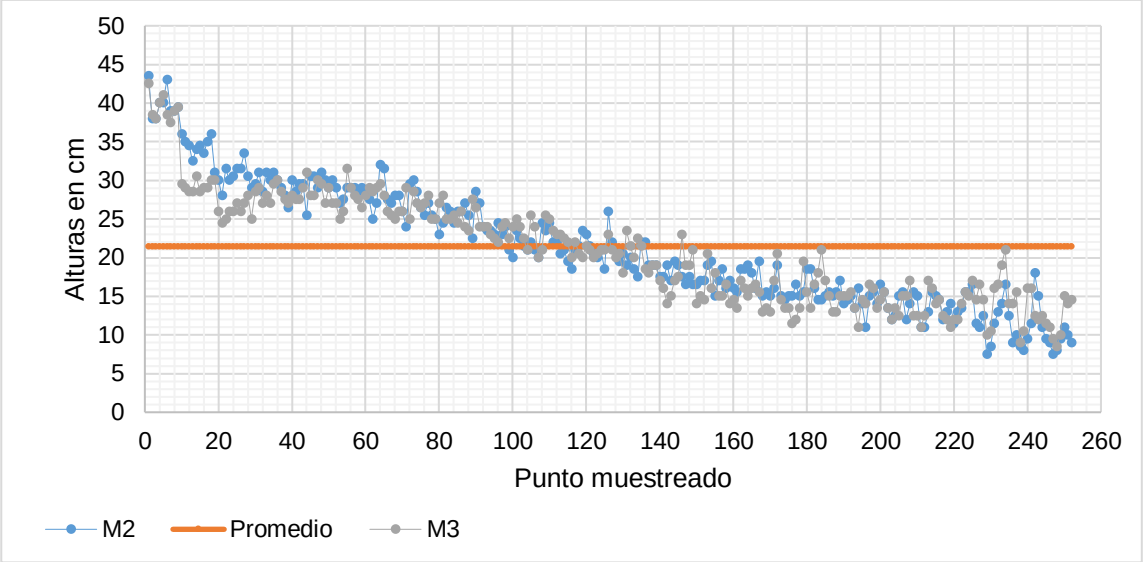


Figura 61. Representación gráfica de las alturas medidas en dos momentos de muestreo (M2 y M3) en el tratamiento de Barbecho repetición 3 en el área pecuaria.

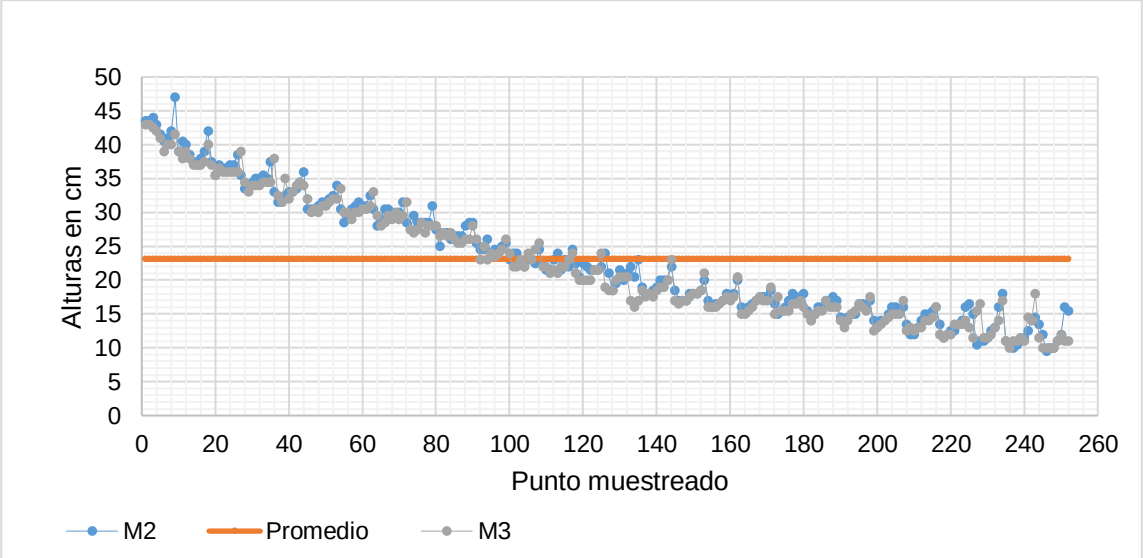


Figura 62. Representación gráfica de las alturas medidas en dos momentos de muestreo (M2 y M3) en el tratamiento de Suelo Desnudo repetición 1 en el área pecuaria.

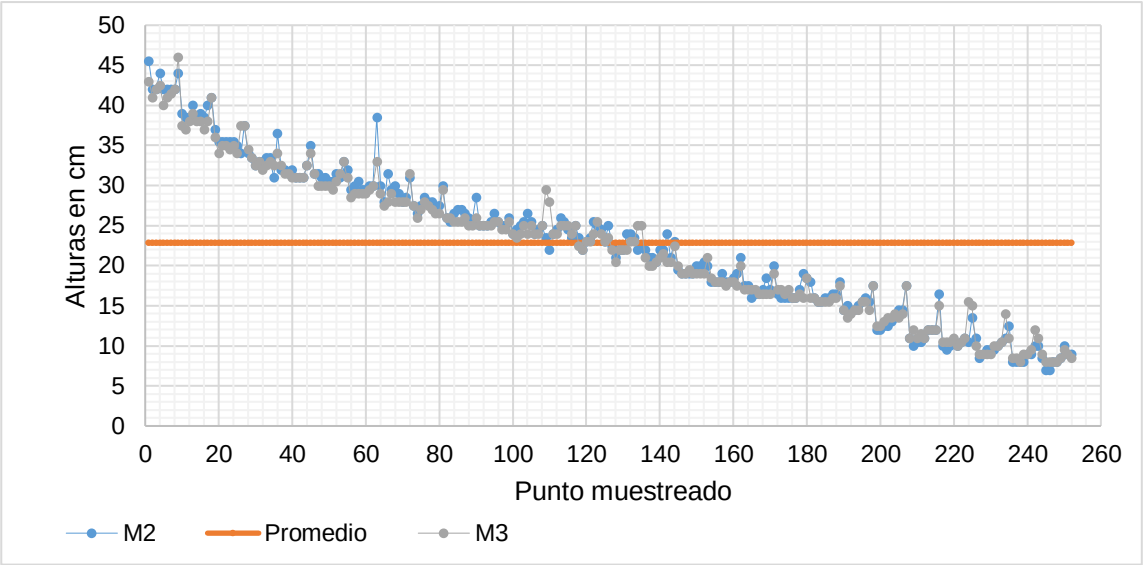


Figura 63. Representación gráfica de las alturas medidas en dos momentos de muestreo (M2 y M3) en el tratamiento de Suelo Desnudo repetición 2 en el área pecuaria.

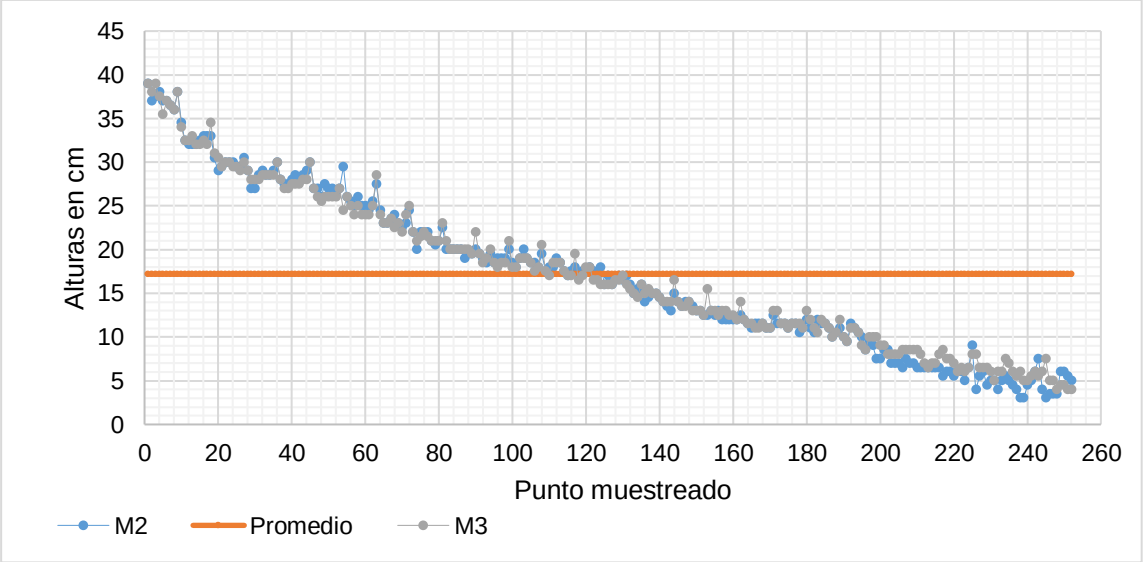


Figura 64. Representación gráfica de las alturas medidas en dos momentos de muestreo (M2 y M3) en el tratamiento de Suelo Desnudo repetición 3 en el área pecuaria.

A continuación, en el cuadro 7 se muestran los resultados promedio de tasa de erosión obtenidos en los tres métodos utilizados para obtener la erosión, en cual se comparan dichos resultados obtenidos con cada método, mostrando las diferencias encontradas entre los métodos.

Cuadro 8. Resultados obtenidos en los tres métodos de medición de erosión.

Uso de suelo	Tratamiento	Método de medición		
		Sedimentación	Modelo USLE	Perfilómetro
		------- *t ha^{-1} año^{-1}* -------		
Pecuario	Suelo desnudo	2.32	25.39	0.9895
	Barbecho	0.52	20.77	3.248
	Barbecho con esquilmo	0.0033	23.41	
	Pastizal inducido	0.0013	0.77	
Agrícola	Suelo desnudo	3.44	29.64	1.51
	Barbecho	0.49	29.45	4.1845
	Barbecho con esquilmo	0.055	30.2	
	Pastizal inducido	0.0037	0.86	

7. CONCLUSIONES

En los cuatro tratamientos analizados en el presente trabajo en el método directo de parcelas de escurrimiento, el tratamiento 1 (suelo desnudo) fue el que más pérdida de sedimentos obtuvo para las dos unidades experimentales, lo que nos indica que el realizar una práctica de manejo reduce considerablemente el riesgo de un suelo a erosionarse.

Por otra parte, en los tratamientos barbecho, barbecho con esquilmo y pastizal inducido no se presentó diferencia significativa para ambas unidades experimentales. Por otro lado, y en términos generales en la unidad experimental del área agrícola se obtuvo mayor arrastre en de sedimentos.

Al comparar el método directo de camas de sedimentación y el método indirecto USLE, se encontró que método indirecto tiene una tendencia de sobre estimar las tasas de erosión obtenidas en los tratamientos evaluados por el método directo de parcelas de sedimentación.

En cuanto a la comparación de los métodos de medición directos, se obtuvieron resultados similares en el primer año de medición del microrrelieve, sin embargo, en el segundo año se obtuvieron resultados diferentes, ya que en el método del perfilómetro los resultados arrojaron ganancias en lugar de pérdida de suelo en el tratamiento de barbecho del área pecuaria y en el tratamiento suelo desnudo del área agrícola.

8. LITERATURA CITADA

Almorox J.A., López B.F., & Rafaelli S. (2010). LA degradación de los suelos por erosión hídrica: Métodos de estimación. Primera edición. Murcia. 17/03/19. https://books.google.com.mx/books?id=bSpiNY_nwOIC&pg=PA353&dq=erosion+del+suelo+pdf&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwiUr4mh34nhAhVZCjQIHcz7DToQ6AEIWjAJ#v=onepage&q=erosion%20del%20suelo%20pdf&f=false

Amundson, R., Arjun H., Justine O., Kyungsoo Y. y William D. (2015). Hillslope soils and vegetation, Geomorphology, Vol 234(Apr): 122-132. DOI: 10.1016/j.geomorph.2014.12.031

Ares, M.G, Varni M y Chagas C. (2020). Runoff response of a small agricultural basin in the argentine Pampas considering connectivity aspects. Hydrological Processes. Vol 34(apr): 3102-3119. DOI: 10.1002/hyp.13782

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

Bolaños G. M. A., Paz P.F., Cruz G.G.O., Argumedo E.J.E., Romero B.V.M y De la Cruz C.J.C. (2016). Mapa de erosión de los suelos de México y posibles implicaciones en el almacenamiento de carbono orgánico del suelo. Terra Latinoamericana 34: 271-288. Disponible en: http://www.scielo.org.mx/pdf/tl/v34n3/2395-8030-tl-34-03-00271.pdf

Borrelli P., Robinson D.A., Fleischer L.R., Lugato E., Ballabio C., Alewell C., Meusburger K., Modugno S., Schütt B., Ferro V., Bagarello V., Oost K.V., Montanarella L. y Panagos P. (2017). An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion. NATURE COMMUNICATIONS, Vol 8(2013):1-13. DOI: 10.1038/s41467-017-02142-7

Cotler H., Cram S., Martinez T.S., y Bunge V. (2015). Evaluación de prácticas de conservación de suelos forestales en México: caso de las zanjas trinchera. Vol. 2015. Num. 88. Pp 5-190. Recuperado el 04/04/2019. De: https://www.elsevier.es/es-revista-investigaciones-geograficas-boletin-del-instituto-118-articulo-evaluacion-practicas-conservacion-suelos-forestales-S0188461116300024. DOI: 10.14350/rig.47378

Cotler, H., Sotelo, E., Domínguez, J., Zorrilla, M., Cortina, S., & Quiñones, L. (2007). La conservación de suelos: un asunto de interés público. Gaceta Ecológica, (83), 5-71. https://www.redalyc.org/pdf/539/53908302.pdf

Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. (2010). Estrategia para la conservación y uso sustentable de la biodiversidad del estado de Aguascalientes. 11/03/19 https://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.

Convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación. (2017). Perspectiva global de la tierra. Primera edición. Bonn, Alemania.

De Regoyos S.M. (2003). Metodología para la evaluación de la erosión hídrica con modelos informáticos. Universidad Politécnica de Madrid. 20/03/19. http://oa.upm.es/450/1/02200329.pdf

Duchaufour, P. (1975). Manual de edafología. Primera edición. Barcelona, España. Toray-Mason.

Espinoza R.E., Andrade L.E., Rivera O.P., Y Romero D.A. (2011). Degradación de suelos por actividades antrópicas en el norte de Tamaulipas. Vol. 54 (53). Pp 77-88. Recuperado el 28/03/2019 de: https://www.redalyc.org/pdf/407/40721572006.pdf

FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). (1993). Erosión de suelos en América Latina. Recuperado el 05/08/2019 de: http://www.fao.org/3/t2351s/T2351S0a.htm

FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). (2005). Optimización de la humedad del suelo para la producción vegetal. Recuperado el 07/08/2019 de http://www.fao.org/3/y4690s/y4690s00.htm#Contents

FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). (2019). Propiedades físicas del suelo. Recuperado el 14/04/2019. De: http://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/propiedades-del-suelo/propiedades-fisicas/es/

FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). (2019). Propiedades químicas. Portal de suelo de la FAO http://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/clasificacion-de-suelos/sistemas-numericos/propiedades-quimicas/es/

FAO (2019). Outcome document of the Global Symposium on Soil Erosion. Rome, Italy. http://www.fao.org/3/ca5697en/ca5697en.pdf

FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). (2015). Status of the World´s Soil Resources. Editorial Board. Recuperado el 05/08/2019 de: http://www.fao.org/3/i5199e/I5199E.pdf

Fitzpatrick E. A. (2012). introducción a la ciencia de los suelos. 1ra ed. Ed. TRILLAS. ISBN: 9789682454127

Ffolliontt P.F., Brooks K.N., Neary D.G, Pizarro T.R, & García C.P. (2013). Soil Erosion and Sediment Production on Watershed Landscapes: Processes and Control. 17/03/19. https://www.fs.fed.us/rm/pubs_other/rmrs_2013_ffolliott_p001.pdf

Flores D.L., & Alcalá M.J.R. (2010). Manual de procedimientos analíticos. Laboratorio de física de suelo. Universidad Nacional Autónoma de México.

Recuperado el 14/04/2019 de: http://www.geologia.unam.mx:8080/igl/deptos/edafo/lfs/MANUAL%20DEL%20LABORATORIO%20DE%20FISICA%20DE%20SUELOS1.pdf.

García M.R. (2006). Desarrollo de una metodología para la medición de la rugosidad superficial del suelo. Universidad Politécnica de Madrid. Recuperado de: http://oa.upm.es/466/1/ROSARIO_GARCIA_MORENO.pdf

Garrido, A. y Cotler H. (2010). Degradación de suelos en las cuencas hidrográficas de México. pp. 104-107. In: H. Cotler A., A. Garrido Pérez, N. Luna González, C. Enríquez Guadarrama y M. L. Cuevas Fernández (eds.). Las cuencas hidrográficas de México, diagnóstico y priorización. Pluralia. México, D. F.

Giménez R, Govers G. (2002). Flow detachment by concentrated flow on smooth and irregular beds. Soil Science Society of America Journal 66: 1475–1483. DOI: 10.2136/sssaj2002.1475

Goldberg S. & Weiss G. (2004). Obtención de un índice de riesgo de erosión eólica y su aplicación en la provincia de Buenos Aires, Argentina. Vol. 29. (1 y 2). Pp 17-26. 17/03/19. http://www.scielo.org.ar/pdf/meteoro/v29n1-2/v29n1-2a02.pdf

He, S., Qin F., Zheng Z., y Li T. (2018). Changes of soil microrelief and its effect on soil erosion under different rainfall patterns in a laboratory experiment. CATENA, Vol 162(mar): 203-215. https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.11.010

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2014). Erosión de suelos en México. Aguascalientes, recuperado el 07/03/2019 de: http://www.beta.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/boletines/2014/especiales/especiales2014_07_1.pdf

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2017). Anuario estadístico y geográfico de Aguascalientes 2107. México. Editorial INEGI. Recuperado

el 28/04/2019 de: https://www.datatur.sectur.gob.mx/ITxEF_Docs/AGS_ANUARIO

INEGI (2019). Cuentas económicas y ecológicas de México 2018. Comunicado de prensa núm. 640/19, 4 de diciembre de 2019. Disponible en: Comunicado de Prensa. Cuentas Económicas y Ecológicas de México, 2018 (inegi.org.mx)

IPBES (2018). The IPBES assessment report on land degradation and restoration. Montanarella, L., Scholes, R., and Brainich, A. (eds.). Secretariat of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services, Bonn, Germany. 744 pages.

Khan T. O. (2013). SOILS. PRINCIPLES, PROPERTIES AND MANAGEMENT. Edited by Department of Soil Science and University of Chittagong. First. Ed. Chittagong, Bangladesh: SPRINGER. https://doi.org/10.1007/978-94-007-5663-2

Kuske, Ch.R., Yeager Ch.M., Johnson S., Ticknor L.O., y Belnap J. (2012). Response and resilience of soil biocrust bacterial communities to chronic physical disturbance in arid shrublands. ISME Journal 6(Nov): 886-897. doi:10.1038/ismej.2011.153

Laban, P., Metternicht G., y Davies J. (2018). Bioversidad de suelos y carbono orgánico en suelos: cómo mantener vivas las tierras áridas. Gland, Suiza: UICN. viii + 24p

López D.M. & Estrada M.H. (2015). Propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo. Bioagrociencias. Vol. 8(1). Pp. 1-10. Recuperado de: http://www.ccba.uady.mx/bioagro/V8N1/BC%208.1%20Propiedades%20del%20suelo.pdf

López Santos, A. 2016. Neutralizar la degradación de las tierras, una aspiración global. ¿Es posible lograrlo en México? Terra Latinoamericana 34: 239-249. Disponible en:

http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57792016000200239

Mendoza Á., M. E. (2005). Manual de métodos sencillos para estimar la erosión hídrica. Managua, Nicaragua: Universidad Nacional Agraria. Recuperado de: https://es.slideshare.net/marcosalas/1180647717manual-de-erosion

Montes L. M.A.L, Uribe A. E.M., y García C.E.. (2011). Mapa Nacional de Erosión Potencial. Ciencias Tecnología del Agua, vol(2)1: 5-17. Disponible en: http://www.scielo.org.mx/pdf/tca/v2n1/v2n1a1.pdf

Navarro G. G., y Navarro G. S. (2013). Química agrícola: Química del suelo y de los nutrientes esenciales para las plantas. Ediciones Mundi-Prensa. Tercera edición.

Nkonya, E., Gerber N., Baumgartner P., Von Braun J., de Pinto A., Graw V., Kato E., Kloos J., y Walter T. (2011). The economics of land degradation. Toward an integrated global assessment. Development Economics and Policy. Vol. 66. Peter Lang Publishing Group. Frankfurt, Gr.

Núñez S J. (2000). Fundamentos de Edafología. San José, Costa Rica, editorial EUED.

Onnen, N., Eltner A., Heckrath G., y Van Oost K.. (2020). Monitoring soil surface roughness under growing winter wheat with low-altitude UAV sensing: Potential and limitations. Earth Surf. Process. Landforms, Vol 45(14): 3747-3759. DOI: 10.1002/esp.4998

Pandey S., Kumar P., Zlatic M., Nautiyal R. y Panwar V.P. (2021). Recent advances in assessment of soil erosion vulnerability in a watershed. International Soil and Water Conservation Research, https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2021.03.001

Pando M.M., Gutiérrez G.M., Maldonado H.A., Palacio P.J.L., & Estrada C.A.E. (2003). Comparación de métodos en la estimación de erosión hídrica.

Num. 51. Pp 23-36. 11/03/19. http://www.scielo.org.mx/pdf/igeo/n51/n51a3.pdf

Porta J., López A.M., y Poch R. M. (2014). EDAFOLOGÍA, USO Y PROTECCIÓN DEL SUELO. 3ra ed. Ed. Mundi-Prensa. 608 p. Impreso en España. ISBN: 978-84-8476-661-2

Prado H.J.V., Rivera R.P., De León M.B., Carrillo G.M., & Martínez R.A. (2016). Calibración de los modelos de pérdidas de suelo USLE y MUSLE en una cuenca forestal de mexica: caso el Malacate. Vol. 51 (3). Recuperado el 21/04/2019 de: http://www.scielo.org.mx/pdf/agro/v51n3/1405-3195-agro-51-03-00265.pdf

Pritchett W.L. (1986). Suelos forestales: Propiedades, conservación y mejoramiento. Primera edición. México. EDITORIAL LIMUSA.

Ramírez C.R. (1997). Propiedades físicas químicas y biológicas de los suelos. Primera edición. Santafé de Bogotá. Recuperado el 14/04/2019 de: http://bibliotecadigital.agronet.gov.co/bitstream/11348/6636/1/083.pdf

Salcedo P. E., Galvis S. A., Hernández M. T. M., Rodríguez M. R., Zamora N. F., Bugarin M. R., y Carrillo G.R. (2007). La humedad aprovechable y su relación con la materia orgánica y superficie específica del suelo. Terra Latinoamericana, vol. 25(4): 419-425.

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.

Thompson L.M., & Troeh F.R. (2002). Los suelos y su fertilidad. Cuarta edición. Editorial Reverté. Barcelona, España.

TRAXCO. (2021). Humedad en suelos de diferente textura. Consultado (28/05/2021) en: https://www.traxco.es/blog/tecnologia-del-riego/humedad-en-suelos-de-diferente-textura

Vázquez y tapia. (2011). Cuantificación de la erosión hídrica superficial en las laderas semiáridas de la sierra peruana. 11/03/19 http://www.lamolina.edu.pe/pdrh/portal/Investigacion/ArtVasquez.pdf

Von Braun, J., Gerber N., Mirzabaev A., y Nkonya E. (2013). The Economics of Land Degradation. Working paper 109. ZEF Working Paper Series. Department of Political and Cultural Change. Center for Development Research, University of Bonn. ISSN 1864-6638. Disponible en: (PDF) The Economics of Land Degradation (researchgate.net)

Wischmeier, W. H., & Smith, D.D. (1978). Predicting rainfall erosion losses; a guide to conservation planning. Washington, USA. Recuperado el 14/042019 de: https://naldc.nal.usda.gov/download/CAT79706928/PDF

Zhao L. Huang C. & Wu. 2016. Effect of microrelief on water erosion and their changes during rainfall. Earth Surf. Process. Landforms. Vol. 41, 579–586. DOI: 10.1002/esp.3844.