



Universidad Autónoma de San Luis Potosí
Facultad de Ingeniería
Centro de Investigación y Estudios de Posgrado



“Estudio de erosión hídrica en varias localizaciones de la Sierra de San Miguelito, SLP, México: Evaluación de erodibilidad de los suelos y modelado del proceso”.

T E S I S

Que para obtener el grado de:

Maestría en Ciencias de Geología Aplicada

Presenta:

Manuel Jesús Casabella González

Asesor:

Dr. Lorenzo Borselli

Coasesora:

Dra. Jessica Viridiana García Meza



Dedicatoria

Quiero dedicar este trabajo a mi padre y a mi madre, por los que siento un profundo amor, respeto y orgullo, porque siempre han sido fuente de inspiración y ejemplo, gracias a ellos es que soy como soy.

Especialmente a Valle, mi mujer, mi compañera, mi amiga, mi mundo, mi vida... tu eres mi apoyo, mi perseverancia y mi alegría y la razón por la que cada día encuentro algo bueno y renovado dentro de mí, el amor profundo que te tengo, juntos emprendimos un largo camino que nos llevó lejos de nuestras familias y juntos nos ha recibido este país, México, en el que hemos hecho nuestro hogar, adoro cada decisión que hemos tomado juntos, sinceramente me siento dichoso.

"hasta la fin del mundo... contigo"

También a toda mi familia, mis hermanos Kuqui, Carlos, Jorge y Conchi, mis sobrinos, mis tíos, mis suegros, mis cuñados y cuñadas, y mis amigos íntimos, a los que añoro y echo enormemente de menos... pesan los 9.000 Km que nos separan...

Agradecimientos

Quiero agradecer especialmente a mis asesores el Dr. Lorenzo Borselli y la Dra. Viridiana García Meza, por haber creído en mí y por su apoyo incondicional, su guía y sus consejos y también por hacerme sentir que las cosas son más simples de lo que parecen y tratarme siempre como a un amigo.

A mis sinodales Dr. Margarito Tristán González, Dr. José Ramón Torres Hernández y Dr. Rubén Alfonso López Doncel por sus correcciones, su ayuda y comentarios en los exámenes previo y final, haciéndolo extensivo a todos los profesores del Instituto de Geología de la UASLP por compartir sus conocimientos que tanto me han ayudado a crecer y me han hecho ver la Geología como una de mis nuevas pasiones. En especial me gustaría agradecerle al Dr. Damiano Sarocchi por convencerme de enrolarme en esta aventura y por siempre apoyarme desde el principio además de ejercer de tutor.

Al Dr. Israel Razo Soto por ayudarme y asesorarme en los inicios de este proyecto y por revisarme y corregirme muchos de los escritos para seminarios y presentaciones, aún cuando las circunstancias no permitieron que acabáramos todo el proceso juntos.

Al proyecto CONACYT que ha avalado, con fondos, todas las necesidades de este estudio: "Modelado de procesos hidrológicos, dinámica de hidrofobicidad e infiltración, para su aplicación en la evaluaciones del riesgo debido a inundaciones y lahares: aplicación en la ciudad de San Luis Potosí y en el Volcán de Colima" (CONACYT-Ciencia Básica-2012-01 -184060) (Responsable científico Dr. Lorenzo Borselli, Instituto de Geología, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, SLP, México).

Al Laboratorio de Geomicrobiología (Biohidrometalurgia) del Instituto de Metalurgia de la UASLP, responsabilidad de la Dra. Viridiana García Meza, a su técnico L.Q. Silvia Heredia Serrano, a las demás compañeras/os, y en especial a Missael Alejandro Ávila Morales por su amistad e inestimable ayuda con todos los análisis de laboratorio.

A la L.Q. Izanami López Acosta, Técnico responsable del Laboratorio de Análisis Químicos del Instituto de Metalurgia de la UASLP, por su buen, acertado y rápido trabajo con mis análisis de absorción atómica.

A la M.M.I.M. Rosa Lina Tovar Tovar, Técnico responsable del Laboratorio de Difracción de Rayos X del Instituto de Metalurgia de la UASLP

A la M.M.I.M. Martha Alejandra Lomelí Pacheco por su predisposición e indispensable ayuda para los análisis de materia orgánica.

A la Dra. Aurora Robledo Cabrera por facilitarme el uso del equipo del conductímetro con confianza y sin restricciones de tiempo.

Al Laboratorio de Geoquímica del Instituto de Geología, a todos sus integrantes en especial al Dr. Erik Espinosa Serrano, por su ayuda con los análisis de cationes y las clases de geoquímica ambiental.

Al Posgrado de Geología en general y al Instituto de Geología con todos sus integrantes, intendentes, administrativos y académicos, por ofrecerme esta oportunidad y facilitar y crear un ambiente idóneo para el trabajo de este estudio.

A mi estimada M.C. Azalea Judith Ortiz Rodríguez por su clases de SIG y su paciente ayuda con todos los mapas, además de por ser una buena amiga, haciéndolo extensivo a los demás compañeros del LAIMA.

A mis compañeros de generación por brindarme su amistad y apoyo, por todo lo que hemos compartido, en especial a Daniel Cortés Medellín y Sergio Molina Maldonado.

A Alejandra, Álvaro, Daniel, Tanja, Mauricio, Gabi, Santi, Juanjo y Gabi con los que Valle y yo hemos compartido la mayor parte de nuestra vida en esta aventura en México y que forman todos juntos el núcleo principal de nuestras amistades, porque *"quien tiene un amigo... tiene un tesoro"*.

A todas las personas que de alguna manera han contribuido a este trabajo...

¡Gracias!

Índice de contenidos

Resumen	I
Summary	II
A. Introducción	1
A.1. Introducción y consideraciones previas	1
A.2. Hipótesis	6
A.3. Objetivos	6
A.3.1. Objetivo General	6
A.3.2. Objetivos Específicos	6
A.3.3. Metas	6
1. La erosión, la erosión hídrica y la erodibilidad como parámetro fundamental	7
1.1. La erosión	7
1.2. La erosión hídrica	9
1.2.1. Erosión hídrica laminar	14
1.2.2. Erosión hídrica lineal o concentrada	15
1.3. La erodibilidad, un parámetro fundamental	17
1.4. Estimaciones de la erosión hídrica	18
1.5. Modelados de la erosión hídrica	19
1.5.1. USLE	19
1.5.2. RUSLE	20
1.5.3. RUSLE2	21
1.5.4. PSIAC	22
1.5.5. MPSIAC	24
1.5.6. Otros	25
2. Marco geológico del área de estudio	28
2.1. Ubicación y accesos al área	28
2.2. Fisiografía del área de Estudio	29
2.3. Geomorfología del área de Estudio	30
2.3.1. Área de estudio 1 Mesa de los Conejos (MC).	30
2.3.2. Área de estudio 2 Tepetate La Purísima (TP)	30
2.3.3. Área de estudio 3 Tepetate San Antonio (TSA).	32
2.4. Antecedentes del área, vegetación y usos del suelo.	32
2.4.1. Área de estudio 1 Mesa de los Conejos (MC).	32
2.4.2. Área de estudio 2 Tepetate La Purísima (TP)	33
2.4.3. Área de estudio 3 Tepetate San Antonio (TSA).	33
2.5. Geología del área de Estudio	34
2.5.1. Geología general del área de estudio	34
2.5.2. Geología local del área de estudio	35
2.6. Edafología presente en el área de Estudio	39
2.7. Hidrografía del área de Estudio	42
2.8. Climatología atribuible al área de Estudio	44
3. Desarrollo metodológico: análisis fundamentales, evaluación de la erodibilidad y del proceso	48
3.1. Descripción inicial de la metodología	48
3.2. Trabajo de gabinete	48
3.2.1. Recopilación bibliográfica e inventariado	48
3.2.2. Primeras percepciones sobre la problemática	49
3.2.3. Sistemas de información geográfica (GIS)	50
3.2.3.1. Realización de los mapas definitorios del marco general de las áreas de estudio	51
3.2.3.2. Mapas finales/resultado	51
3.2.3.3. Creación del Modelo Digital de Elevación (DEM)	52

3.3. Trabajo de campo	53
3.3.1. Exposición de los datos recogidos en campo	54
3.3.2. Principales parámetros físicos relacionados con la erosión	54
3.3.2.1. Capacidad de infiltración	54
3.3.2.2. Rugosidad, contenido en fragmentos rocosos (R%)	55
3.3.2.3. Resistencia al corte superficial	55
3.3.2.4. Porcentaje de cobertura de la vegetación	56
3.4. Trabajo de laboratorio: Análisis fundamentales	56
3.4.1. Resumen y justificación de los análisis fundamentales realizados	56
3.4.2. Descripción de los análisis realizados	56
3.4.2.1. Preparación de la muestra	56
3.4.2.2. Análisis granulométrico de suelos	57
3.4.2.2.1. Método Mecánico o del Tamizado: Fracción gruesa	59
3.4.2.2.1.1. Observaciones y realización del método	62
3.4.2.2.2. Método del hidrómetro o de Bouyoucos: Fracción fina	63
3.4.2.2.2.1. Observaciones y realización del método	68
3.4.2.3. Análisis por difracción de rayos x	69
3.4.2.4. Capacidad de intercambio catiónico	71
3.4.2.5. Cationes intercambiables	72
3.4.2.6. Contenido de materia orgánica	73
3.4.2.7. Conductividad eléctrica	74
3.4.2.8. pH	75
3.4.2.9. Dispersividad	77
3.4.2.10. Densidad Real y Aparente	78
3.4.2.11. Porosidad	79
3.5. Evaluación de la erodibilidad y del proceso	79
4. El modelo numérico del proceso de erosión	81
4.1. Matemáticas del desprendimiento, flujo, transporte y sedimentación.	81
4.2. Modelado numérico	85
4.2.1. Modelado del área de estudio con el modelo MPSIAC	85
4.2.2. Modelado del área de estudio según el modelo RUSLE	89
5. Síntesis de resultados y discusión	98
5.1. Resultados de parámetros físicos	98
5.1.1. Resistencia al corte superficial	98
5.1.2. Densidad real, aparente y porosidad	98
5.1.3. Granulometría	100
5.1.4. Materia orgánica	102
5.1.5. Dispersividad	103
5.2. Resultados de parámetros químicos	104
5.2.1. Capacidad de intercambio catiónico	104
5.2.2. Cationes intercambiables	105
5.2.3. Difracción de rayos X (DRX)	106
5.2.4. pH	107
5.2.5. Conductividad	108
5.3. Índices de cálculo	109
5.3.1. Porcentaje de sodio intercambiable (ESP)	109
5.3.2. Índice de estabilidad electroquímica (ESI)	110
5.3.3. Porcentaje de fragmentos rocosos	110
5.3.4. Índice de Fournier Modificado (MFI)	111
5.3.5. Índice de erosividad EI_{30}	111
5.3.6. Erodibilidad K	112
5.4. Resultados de los modelos	113
5.4.1. Modelo MPSIAC	113
5.4.2. Modelo RUSLE	116
5.5. Discusión	121

6. Conclusiones	123
I. Referencias	124
II. Anexos	130
II.1. Anexo 1. Relación de resultados de cálculo	130
II.1.1. Granulometría Fracción Gruesa. Cálculos	130
▪ MC_01	130
▪ TP_01	131
▪ TSA_01	132
▪ MC_02	133
▪ TP_02	134
▪ TSA_02	135
• Curvas Granulométricas y Gráficas Fracción Gruesa	136
▪ MC_01	136
▪ TP_01	138
▪ TSA_01	141
▪ MC_02	143
▪ TP_02	145
▪ TSA_02	147
II.1.2. Granulometría Fracción Fina. Cálculos	149
▪ MC_01	149
▪ TP_01	150
▪ TSA_01	152
▪ MC_02	154
▪ TP_02	155
▪ TSA_02	156
• Curvas Granulométricas Fracción Fina	158
▪ MC_01	158
▪ TP_01	159
▪ TSA_01	160
▪ MC_02	161
▪ TP_02	162
▪ TSA_02	163
• Curvas Granulométricas totales	165
▪ MC_01	165
▪ TP_P1	166
▪ TSA_01	168
▪ MC_02	170
▪ TP_02	171
▪ TSA_02	172
II.1.3. Test de dispersividad	174
▪ Con agua desionizada lote_01	174
▪ Con agua desionizada lote_02	176
▪ Con solución NaOH 1 normal lote_01	178
▪ Con solución NaOH 1 normal lote_02	180
II.1.4. Cálculos capacidad de intercambio catiónico	183
II.1.5. Cálculos concentración de cationes intercambiables	185
II.1.6. Difracción de rayos X	187
• Fracción total suelo lote_01	187
• Fracción total suelo lote_02	195
• Fracción arcillas lote_01	201
• Fracción arcillas lote_02	209
II.1.7. Cálculos de conductividad extracto diluido 1:5	215
II.1.8. Índice de Fournier modificado	217
II.1.9. Índice de erosividad $E_{I_{30}}$	218

Índice de figuras

Figura 1. Situación de degradación de los suelos nacionales (recurso edáfico), México 2013	4
Figura 2. Porcentaje de los tipos de erosión presentes en México en 2014	5
Figura 3. Tipos de erosión según el agente activo y su carácter.	7
Figura 4. Porcentaje de las formas de erosión presentes en México a 2014	9
Figura 5. Proceso de la erosión hídrica, flujo con carga de sedimentos.	12
Figura 6. Fases de formación y desarrollo de las cabeceras de corte e inicio de una cárcava.	16
Figura 7. Ubicación espacial de las áreas de estudio	28
Figura 8. Provincias Fisiográficas de México y ubicación del área de estudio.	29
Figura 9. Visualización del subárea de estudio Mesa de Conejos_01	30
Figura 10. Vista panorámica del área de estudio TP_01	31
Figura 11. Vista panorámica del área de estudio TSA_01	32
Figura 12. Unidades geológicas presentes en el área de estudio.	35
Figura 13. Columna estratigráfica de la Sierra de San Miguelito.	39
Figura 14. División Edafológica de las áreas de estudio.	39
Figura 15. Grupos de suelos presentes en los municipios implicados en las áreas de estudio	41
Figura 16. Imágenes de los perfiles de suelo presentes en las áreas de estudio.	42
Figura 17. Ubicación de las áreas de estudio en las respectivas cuencas y subcuencas hidrográficas.	43
Figura 18. Hidrología superficial y adyacente a las áreas de estudio	44
Figura 19. Tipos de climas presentes en los principales municipios que abarcan las áreas de estudio	45
Figura 20. Ubicación de las estaciones meteorológicas usadas para definir los datos climatológicos relevantes de las áreas de estudio.	46
Figura 21. Precipitación anual de las estaciones consideradas	46
Figura 22. Isoyetas de precipitación e isolíneas de temperatura en temporalidad anual.	47
Figura 23. Perfil de suelo y criterio de zonificación vertical.	53
Figura 24. Imagen del medidor de campo para la resistencia al corte superficial	56
Figura 25. Realización del Test de dispersividad o <i>Crumb Test</i>	78
Figura 26. Tendencias de los valores de K_s	82
Figura 27. Concreciones salinas en las muestras de los horizontes arcillosos	99
Figura 28. Curvas granulométricas de -4 a 13 ϕ (<i>Phi</i>), de la subárea de estudio MC_01	100
Figura 29. Triángulos de las clases texturales de los suelos de estudio.	101
Figura 30. Clasificación de los grados de dispersividad de suelos según el <i>Crumb Test</i> .	103
Figura 31. Resultados del test de dispersividad de las muestras del área de estudio 1 MC	103
Figura 32. Gráficas de los resultados de difracción sobre la fracción completa del suelo	106
Figura 33. Resultados del análisis DRX para la fracción de arcillas.	107
Figura 34. Curva de precipitación en 24h para un período de retorno de 2 años	114
Figura 35. <i>Raster</i> de interpolación del índice de erosividad EI_{30} usada para el modelo RUSLE	117
Figura 36. <i>Raster</i> de interpolación de los datos empíricos del índice de erodibilidad del modelo RUSLE	117
Figura 37. Resultado del cálculo del factor LS del modelo RUSLE	118
Figura 38. Resultados del mapa de usos de suelo para el factor C del modelo RUSLE	118
Figura 39. Resultados del mapa de protección del suelo para el factor P del modelo RUSLE	119
Figura 40. Mapa final de erosión del modelo RUSLE	119
Figura 41. Ubicación de las subáreas de estudio en el mapa de final de erosión	120

Índice de tablas

Tabla 1. Pérdida de suelo tolerable (Valor T) en un terreno según profundidad y material parental	9
Tabla 2. Consecuencias de los impactos generados por la erosión hídrica a diferentes niveles.	10
Tabla 3. Diferentes puntos de vista desde los que estudiar la erosión hídrica.	11
Tabla 4. Valores y clasificación de la erodibilidad	18
Tabla 5. Rangos y clasificación de las clases de pérdida de suelo del modelo PSIAC.	22
Tabla 6. Valoración de los factores del PSIAC con respecto a las características de los factores que afectan a los suelos estudiados	23
Tabla 7. Valuación de las características de los factores y relación rangos-clasificación del modelo PSIAC.	23
Tabla 8. Descripción de las ecuaciones necesarias para determinar los factores del modelo MPSIAC	24
Tabla 9. Hidrología general, nombres de cuencas, subcuencas, cuerpos y corrientes de agua de los municipios implicados en las áreas de estudio.	43
Tabla 10. Climatología general y tipos de climas de los municipios implicados en las áreas de estudio.	44
Tabla 11. Promedios de las Estaciones Meteorológicas consideradas en el estudio.	46
Tabla 12. Relación de muestras por subárea, ubicación geográfica y descripción de las mismas.	54
Tabla 13. Capacidad de infiltración	55
Tabla 14. Escala granulométrica utilizada en sedimentología propuesta por Blair y McPherson (1999).	58
Tabla 15. Relación de pesos bruto y neto de cálculo de cada muestra	62
Tabla 16. Valores de θ (en ASTM D422 este parámetro es nombrado como K)	66
Tabla 17. Densidad (ρ) y viscosidad (η) del agua a temperaturas diferentes (T)	66
Tabla 18. Valores del coeficiente de corrección a para distintos pesos específicos de las partículas del suelo ASTM D422-63.	67
Tabla 19. Examen previo para detectar la presencia de materia orgánica	69
Tabla 20. Límites de cuantificación para los cationes implicados	72
Tabla 21. Criterios de evaluación de un suelo con respecto a su pH	77
Tabla 22. Constantes utilizadas para el cálculo del parámetro D_g , en el caso de tres componentes texturales básicas.	80
Tabla 23. Evaluación de la geología superficial	86
Tabla 24. Promedios generales de las áreas de estudio.	87/115
Tabla 25. Porcentajes de uso de suelo con respecto a su área de estudio	88
Tabla 26. Subfactores del método SSF	89
Tabla 27. Clasificación del Índice de Fournier Modificado (IFM)	90
Tabla 28. Clasificación de rangos típicos de R anual	91
Tabla 29. Tabla de datos del Lote de muestras 01, muestreos de otoño invierno	91
Tabla 30. Clasificación en rangos del factor K	92/113
Tabla 31. Datos de interpolación de los resultados del Factor K	92
Tabla 32. Clasificación y valoración de los diferentes grupos de protección del suelo con respecto a la cobertura vegetal	96
Tabla 33. Clasificación y valoración de los diferentes grupos de protección del suelo con respecto a las prácticas de conservación.	97
Tabla 34. Resultados de las pruebas de campo de resistencia al corte superficial	98
Tabla 35. Resultados de los experimentos de densidad y cálculo de la porosidad	98
Tabla 36. Interpretación de los resultados de densidad aparente	99
Tabla 37. Resultados del ensayo del hidrómetro y clases texturales relacionadas.	102
Tabla 38. Resultados de contenido de materia orgánica por muestra	102
Tabla 39. Resultados de CIC a través del método As-13 con tiourea de plata (NOM-021)	104
Tabla 40. Rangos de valores de la CIC	104
Tabla 41. Resultados de los análisis de cationes intercambiables.	105
Tabla 42. Resultados del análisis de pH	107
Tabla 43. Clasificación del pH en los suelos	108
Tabla 44. Resultados de la prueba de conductividad	108
Tabla 45. Clasificación de la conductividad eléctrica	108

Tabla 46. Resultados de los cálculos del porcentaje de sodio intercambiable (ESP).	109
Tabla 47. Resultados de cálculo el índice de estabilidad electroquímica (ESI)	110
Tabla 48. Resultados del porcentaje de fragmentos rocosos en la matriz del suelo	111
Tabla 49. Resultados del Índice de Fournier modificado, MFI.	111
Tabla 50. Resultados del Índice de erosividad, EI_{30} .	112
Tabla 51. Resultados de la evaluación de la erodibilidad	112
Tabla 52. Cálculo del subfactor X_2 del modelo MPSIAC	113
Tabla 53. Resultados de cálculo del caudal máximo anual (Q_m) y volumen anual e escorrentía (V_{ae})	114
Tabla 54. Resultados de la variable X_4 del modelo MPSIAC	114
Tabla 55. Resultados de la variable X_6 y X_7 del modelo MPSIAC	115
Tabla 56. Resultados del método del SSF para calcular las variables X_8 y X_9	115
Tabla 57. Resultados de la puntuación (<i>Rating</i>) de las variables de cálculo de los factores del modelo MPSIAC	115
Tabla 58. Grados de intensidad, clases y rendimientos teóricos del Rating del modelo MPSIAC	116
Tabla 59. Resultado final el modelo MPSIAC	116
Tabla 60. Comparativa final de resultados de ambos modelos MPSIAC y RUSLE	120

Índice de fórmulas

01	Ecuación Universal de Pérdida de Suelo	20
02	Rendimiento de sedimento Johnson y Gembhart (1982) model MPSIAC	24
03	Puntuación de los factores del modelo MPSIAC	24
04	Resistencia al corte superficial	55
05	Constante K de la ecuación de resistencia al corte superficial	55
06	Granulometría. Peso total de la muestra	60
07	Granulometría. Peso retenido en cada tamiz	60
08	Granulometría. Peso neto de cálculo	60
09	Granulometría. Pérdida total	60
10	Granulometría. Porcentaje de pérdida	60
11	Granulometría. Porcentaje de la fracción remanente o retenida	60
12	Granulometría. Porcentaje Acumulado	61
13	Granulometría. Porcentaje Acumulado de la fracción pasante	61
14	Sedimentación. Ecuación de la velocidad de la ley de Stokes.	63
15	Sedimentación. Diámetro de la partícula D	63
16	Sedimentación. Diámetro de la partícula D_ Velocidad corregida	63
17	Sedimentación. Gravedad específica del suelo	63
18	Sedimentación. Diámetro de la partícula D_ Gravedad específica corregida	63
19	Sedimentación. Diferentes expresiones del Diámetro de la partícula D	63
20	Sedimentación. Correcciones necesarias de las lecturas del hidrómetro	65
21	Sedimentación. Concentración del suelo (C) en suspensión en g/L,	65
22	Sedimentación. Corrección de la temperatura	65
23	Sedimentación. Valor de θ	66
24	Sedimentación. Densidad del suelo muestreado (Gs) o densidad de sólidos	67
25	Sedimentación. Altura de caída h, ecuación característica del hidrómetro	67
26	Sedimentación. Velocidad de caída de las partículas	67
27	Sedimentación. Porcentaje en peso de las partículas para el hidrómetro tipo 151H	67
28	Sedimentación. Porcentaje en peso de las partículas para el hidrómetro tipo 152H	67
29	Sedimentación. Factor (a) de corrección por gravedad específica	67
30	Sedimentación. Corrección por menisco experimental	68
31	Sedimentación. Cálculos de corrección por menisco experimental	68
32	Sedimentación. Corrección por defloculante experimental	68
33	Sedimentación. Cálculos de corrección por defloculante experimental	68
34	Difractometría de rayos X. Ángulo θ de el haz incidente	70
35	Fórmula de cálculo de la capacidad de intercambio catiónico	72
36	Porcentaje de materia orgánica del método de pérdida por calcinación	74
37	Conductividad. Constante de celda	75
38	Densidad real (δ_r)	78
39	Densidad aparente (δ_a)	78
40	Porosidad	79
41	Logaritmo de la media geométrica de la distribución de tamaño de partícula (D_g)	79
42	Tamaño de partícula (D_g) respecto a los principales componentes texturales	79
43	logaritmo de la desviación estándar (S_g) geométrica de D_g ,	80
44	Ecuación simplificada para S_g respecto a los principales componentes texturales	80
45	Velocidad final de caída de las gotas de lluvia	81
46	Ángulo de eyección de las partículas por las gotas	81
47	Variación del ángulo de eyección con la profundidad de un film de agua	81
48	Energía cinética en el momento del impacto	81
49	Relación entre el diámetro medio de las partículas eyectadas y la distancia alcanzada	82
50	Flujo neto de partículas erosionadas	82
51	Energía del impacto (E)	82
52	Coefficiente empírico (B_H)	82
53	Velocidad del flujo	83
54	Coefficiente de Manning (n)	83

55	Poder de corriente del fluido (p)	83
56	Tensión de corte del flujo (τ_f)	83
57	Capacidad de transporte del flujo propuesta por Morgan	84
58	Cantidad de tierra que se desprende (D_f) por encima de la que se deposita	84
59	Coefficiente de proporcionalidad (B) que tiene en cuenta la resistencia al corte del suelo	84
60	Umbral para el establecimiento de una cabecera de cárcava	84
61	Tasa de retracción de las cabeceras de cárcavas (Gr)	84
62	Anchura del canal (w) con la descarga de escorrentía formativa del canal (Q)	85
63	Coefficiente (α) que varía con el ancho del canal	85
64	Escorrentía. Gasto máximo, o caudal máximo anual	86
65	Escorrentía. Tiempo de concentración	87
66	Índice modificado de Fournier (IFM)	90
67	Índice de Erosividad de la Lluvia EI_{30}	90
68	Longitud efectiva de curva de nivel (D_{ij})	93
69	Área específica de captación (Ae)	93
70	Ecuación para la estimación del factor LS en <i>RUSLE</i>	95
71	Porcentaje de sodio intercambiable (ESP)	109
72	Índice de estabilidad electroquímica (ESI)	110

Resumen

El interés por la erosión hídrica que se muestra en este proyecto nace de la problemática existente en la actualidad en todos los ámbitos (civil, científico, político, ambiental, etc.) en torno a la conservación y protección de los principales recursos naturales esenciales, entre ellos el suelo, entendiendo al mismo como un sistema natural complejo y dinámico que cumple con determinados servicios ambientales indispensables para el sostenimiento tanto del ecosistema como de la vida humana. También pesa el hecho de que un gran porcentaje de los suelos del territorio nacional mexicano (entre el 60 y 90%) se halla en algún tipo de fase de degradación de "tierras" y que en más de la mitad del total de los suelos del territorio (52.86%), esta degradación se deba a procesos de erosión hídrica.

De este modo, para el desarrollo de la presente investigación se seleccionaron tres áreas de estudio cercanas a la ciudad de San Luis Potosí con un avanzado estado de degradación de suelo debido a una fuerte erosión hídrica. El objetivo principal del proyecto fue determinar el proceso erosivo a través de dos modelos propuestos de erosión hídrica en una temporalidad anual a través de una evaluación de la erodibilidad de los suelos, como principal característica de resistencia al proceso erosivo, de manera que el método sea transportable a zonas de similares características, atendiendo a los objetivos específicos de realizar una caracterización precisa del suelo, físico-estructural y química, en base a los trabajos de campo, gabinete y laboratorio, para alcanzar una rigurosa caracterización geomorfológica de los procesos de erosión hídrica en las áreas de estudio. Para este fin se hizo uso tanto de la bibliografía existente, los datos recogidos en campo y obtenidos en laboratorio, como de los medios digitales disponibles, utilizando imágenes satelitales y realizándose digitalizaciones de la carta geológico-minera que implicaba a las áreas de estudio y de imágenes de percepción remota sobre las que se realizaron clasificaciones supervisadas de los elementos presentes en las áreas estudiadas.

Así pues para la evaluación numérica de la erosión hídrica actual de las zonas estudiadas, se usó un modelo comprobado internacionalmente (MPSIAC), pero innovador en México ya que no se han encontrado evidencias de haber sido usado en el país, realizado de forma empírica, contrastado con otro modelo de amplio uso y comprobada eficacia a nivel nacional (RUSLE) en base digital, utilizando en ambos casos una evaluación novedosa de la erodibilidad, puesto que el *software* del algoritmo *KUERY1.4* de Borselli *et al.* (2012), tampoco ha sido usado en territorio nacional hasta este proyecto.

Los resultados de evaluación de la erodibilidad nos muestran una tendencia a la mejora y mayor protección intrínseca según aumenta la profundidad, lo que contribuye de forma positiva al equilibrio de estabilidad salino-estructural, pues estos suelos presentan lixiviación de cationes formadores de sales hacia horizontes profundos. La granulometría y las clases texturales derivadas son, claramente, uno de los factores más significativos, tanto en la evaluación de la erodibilidad, como en los equilibrios físicos y químicos del suelo.

En el modelo empírico (MPSIAC) se plantearon dos escenarios de evaluación en base al coeficiente de escorrentía superficial (desfavorable (D) y conservador (C)) que arrojaron unos resultados máximos de erosión hídrica actual entre (D/C) 10.13/9.65 T/ha/año para el área de estudio 1 (Mesa de los Conejos); (D/C) 30.59/12.74 T/ha/año en el área de estudio 2 (Tepetate La Purísima); y (D/C) 10.23/8.3 T/ha/año para el área de estudio 3 (Tepetate San Antonio). En el modelo digital (RUSLE) se realizó la evaluación digital conjunta de todas las áreas obteniendo una estimación de la erosión hídrica actual máxima igual a 8.22 T/ha/año, lo que supone que, teniendo en consideración que un modelo empírico alcanza un mayor grado en el número de observaciones y que éstas son siempre de mayor exactitud, la diferencia entre los modelos es aceptable y se ajusta bien a los resultados del escenario conservador, corroborando que los modelos seleccionados han sido adecuados a las áreas de estudio y han producido unos resultados coherentes, y comparables a otras áreas del mundo con características climático geográficas semejantes. En sí, estos resultados suponen unos niveles alarmantes de los procesos erosivos, que generan unos rendimientos de sedimento elevado, los cuales podrían tener algunas consecuencias críticas si se dieran situaciones de acumulación en algún punto, y el hipotético caso de una liberación violenta por algún evento pluviométrico de alta energía

En la evaluación de ambos modelos se demuestran como variables más significativas el efecto topográfico y la agresividad del clima como factores de energía o activadores del proceso y la erodibilidad principalmente, aunque también el porcentaje de cobertura como factores de resistencia. En conclusión los objetivos han sido alcanzados, la implementación del modelo MPSIAC en México ha sido coherente y los resultados demuestran que son áreas con una erosión extrema de avanzado estado y en regresión hacia los horizontes parentales.

Summary

The main interest about water erosion, shown in this project, stems from the problems existing today in all areas (civil, scientific, political, environmental, etc.) about the conservation and protection of essential natural resources, including soil, understanding it as a dynamic and complex natural system that meets certain environmental services indispensable for sustaining both ecosystem and human life. It also weighs the fact that a large percentage of the land the Mexican territory (between 60 and 90%) is in some kind of degradation phase of "land" and that more than half of all soils territory (52.86%), this degradation is due to water erosion processes.

Thus, for the development of this research three areas of study were selected near the city of San Luis Potosi with advanced soil degradation due to strong water erosion. The main objective of the project was to determine the erosion process through two proposed models of water erosion in an annual temporality, through an assessment of the erodibility of soils, which is the main feature of resistance to erosion process, so that the method to be transportable to areas with similar characteristics, taking into account the specific objectives for an accurate soil physical-structural and chemical characterization, based on field work, cabinet and laboratory, to achieve a rigorous characterization of geomorphic processes of water erosion in the study areas. For this purpose made use of both the existing literature, the data collected in the field and those obtained in laboratory, and digital media available, using satellite images and performing scans of the geological-mining letter involving areas of study and remote sensing images on which supervised classifications of the elements were made in the studied areas.

So for the numerical evaluation of the current water erosion of the studied areas, an internationally proven model (MPSIAC), but innovative in Mexico was used, because it has not found evidence of having been used in the country, made empirically, contrasted with another model widely used and proven nationally (RUSLE) in digital base, using in both cases a new evaluation of erodibility, since the software algorithm of Borselli KQUERY1.4 et al. (2012), it hasn't been used in country until this project.

The results of evaluation of erodibility show a trend towards improvement and increased intrinsic protection with increasing depth, which contributes positively to the balance of salt-structural stability, since these soils presented leaching salt-forming cations into deeper horizons. The granulometry and textural derived classes are clearly one of the most significant, both in assessing the erodibility, as physical and chemical equilibria soil factors.

In the empirical model (MPSIAC) two evaluation scenarios based on the ratio of surface runoff were proposed (unfavorable (U) and conservative (C)) that yielded maximum results from current water erosion between (U/C) 10.13/9.65 T/ha/year for the study area 1 (Mesa de los Conejos); (U/C) 30.59/12.74 T/ha/year in the study area 2 (Tepetate La Purisima); and (U/C) 10.23/8.3 T/ha/year for the study area 3 (Tepetate San Antonio). In the digital model (RUSLE) a digital joint evaluation of all areas was done obtaining an estimate of the maximum current water erosion equal to 8.22 T/ha/year, which means that, considering that an empirical model achieves higher degree on the number of observations and always more accurate, the difference between the models is acceptable and fits well with the results of the conservative scenario, confirming that the selected models have been well adapted to the study areas and have produced consistent results, comparable to other areas of the world with similar climatic geographical characteristics. In itself, these results represent alarming levels of erosion processes that generate high yields of sediment, which could have critical consequences if some accumulation situations are given at some point, and the hypothetical case of a violent release because of a high energy rainfall event.

In the evaluation of both models are shown as the most significant variables topographic effect and the aggressiveness of the climate as energy factors or process triggerers, and the erodibility mainly, but also the percentage of coverage as resistance factors. In conclusion, the objectives have been achieved, implementation of the model MPSIAC in Mexico has been consistent and the results show that this are areas with extreme erosion of advanced stage and regression toward parental horizons.

A. Introducción

A.1. Introducción y consideraciones previas. La importancia del recurso suelo

Dentro de la sociedad actual, existe un movimiento creciente de concienciación de la necesidad de proteger los recursos naturales con el fin de satisfacer y asegurar las necesidades presentes y futuras demandadas por y para dicha sociedad. Uno de los principales recursos que brinda la naturaleza al ser humano es el suelo, considerado como uno de los recursos naturales más importantes, ya que es esencial para la vida, como lo es el aire y el agua.

Como recursos naturales se entienden todos aquellos bienes, servicios o componentes, bióticos o abióticos, proporcionados por la naturaleza sin alteraciones, susceptibles de ser aprovechados en su estado natural por la humanidad para la satisfacción de sus necesidades.

Antiguamente el suelo era considerado un recurso natural renovable, pero la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) pasó a definirlo como un recurso no renovable ya que *"su pérdida y degradación no son reversibles en el curso de una vida humana. De hecho, un centímetro de suelo puede tardar cientos de miles de años en formarse desde la roca madre"* (FAO, 2015).

Los factores que intervienen en la génesis del suelo son diversos; el clima a través de la precipitación, la evapotranspiración y la temperatura principalmente; la geomorfología a través de la topografía (orientación, altitud, pendiente), el drenaje, las características derivadas del nivel freático y otros procesos geomórficos como los procesos fluviales, la erosión y la deposición; la biota, por medio de la vegetación y la fauna del suelo (macrofauna, mesofauna y microorganismos); el material parental original (tipo de roca, comportamiento frente a fluidos, productos de su meteorización, etc); y el tiempo, dando lugar al perfil del suelo mediante los procesos de formación. En promedio el suelo tarda en formarse de 100 a 400 años por centímetro de cubierta fértil, a través de la interacción del clima, la topografía, organismos (plantas, animales y el hombre) y minerales (Doran, 1996), pero se necesitan del orden de 10.000 años, como término medio, para el desarrollo completo de un suelo hasta su estado maduro.

El suelo podría ser definido de múltiples formas dependiendo de la visión o disciplina desde la que se pretenda definir, conviene primero pues, describir los límites en los que se ubica tan preciado recurso. Así, en su límite superior se halla la atmósfera y las aguas superficiales poco profundas, es decir aquellas aguas que son capaces de soportar el crecimiento de raíces, además de las plantas y los materiales orgánicos que no han empezado a descomponerse, por lo que aún no han sido incorporados. Los límites horizontales se determinan a través de las áreas donde el suelo es invadido por aguas profundas, materiales estériles, rocas o hielo. El límite inferior lo forma la roca dura y continua, que se considera el material parental. Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA, 1998)

Geológicamente se define como la parte superficial de la corteza terrestre, constituida por una capa de espesor variable de material fragmentario no consolidado, derivado de un largo y complejo proceso de desintegración o alteración física y química de las rocas, inducido por una serie de factores como los cambios de temperatura, el transcurrir del tiempo, la acción erosiva del agua y el viento y la acción de los seres vivos incluyendo a la micro fauna y flora.

Para completar esta definición desde el punto de vista edafológico-agronómico se dice que es un cuerpo natural complejo, contemplado como un sistema natural dinámico, formado por dos componentes, uno abiótico, dividido en una fase sólida (minerales), una fase líquida y una fase gaseosa, y otro componente biótico (macro- y microorganismos y la materia orgánica procedente de ellos incorporada al sistema), organizado en horizontes o capas de materiales diferenciados de la roca madre, como resultado de adiciones, pérdidas, transferencias y transformaciones de materia y energía, conteniendo la capacidad para servir de soporte y nutrimento a las producciones vegetales y animales en un medio natural y/o modificado por el hombre.

De este modo, el suelo es entendido como una intersección entre atmósfera, litosfera, hidrosfera y biosfera y considerado como un subsistema de los ecosistemas terrestres, lo que añade una componente ambiental a su definición. De hecho el suelo cumple con determinados servicios

ambientales indispensables para el sostenimiento tanto del ecosistema como de la vida humana, constituye de por sí un medio filtrante que permite la recarga de los acuíferos, influyendo también, de este modo, en la calidad de las aguas, igualmente puede ser considerado un sistema depurador ya que tiene la capacidad de degradar o inmovilizar contaminantes, es el medio donde se realizan los ciclos biogeoquímicos necesarios para el reciclaje de los compuestos orgánicos, por otro lado es el hábitat de desarrollo y refugio de millones de organismos, desde células microscópicas a pequeños mamíferos y reptiles, que se enlazan en complejas redes tróficas, manteniendo así una amplia y necesaria biodiversidad y es un elemento del paisaje y del patrimonio cultural. En resumen según el "Manual de Calidad de Suelo" del departamento de agricultura de los Estados Unidos de América (USDA, 1999) estas funciones claves son:

- Sostener la actividad, diversidad y productividad biológica
- Regular y particionar el agua y flujo de solutos
- Filtrar, drenar, inmovilizar y desintoxicar materiales orgánicos e inorgánicos, incluyendo desechos municipales y de la industria
- Almacenar y posibilitar el ciclo de nutrientes y otros elementos biogeoquímicos
- Brindar apoyo a estructuras socioeconómicas y protección de tesoros arqueológicos

Este concepto sistémico del suelo implica tres características fundamentales:

- Complejidad: El suelo está formado por partículas minerales inorgánicas (arena, limo y arcilla, grava, piedras y roca), aire que forma una atmósfera interna, una economía particular del agua, materia orgánica y organismos vivos, es decir una flora y fauna determinada y sus residuos, estando todos estos componentes fuertemente relacionados. La contribución específica de los diferentes componentes al sistema del suelo tiene un efecto importante sobre sus funciones y depende del tipo de suelo, y de los factores relacionados con su formación. De su composición también pueden formar parte materiales fabricados por el hombre.
- Dinamismo: El suelo alcanza de manera progresiva sus propiedades por la acción combinada del sistema. La roca madre es alterada a través del clima y la vegetación; el factor topográfico influencia los lugares de deposición, donde comienza a formarse y acumularse la capa que conocemos como suelo; entonces los residuos vegetales y animales sobre esta capa, son atacados por los macro y microorganismos del suelo, formando complejos orgánicos coloidales que se denominan humus y que después se mineralizan progresivamente; se establecen uniones más o menos íntimas entre los minerales procedentes de la alteración de la roca y el humus; las sustancias solubilizadas y las partículas coloidales sufren migraciones. Así, al final de su proceso evolutivo, el suelo da lugar a un medio estable y equilibrado con el clima, la topografía, el sustrato geológico, el tiempo y los factores biológicos (plantas, animales, microorganismos y seres humanos). Sin embargo, este equilibrio puede romperse mediante una modificación apreciable de alguno de los factores, como el clima o la vegetación, comenzando un nuevo proceso de evolución hasta alcanzar el equilibrio.
- Permeabilidad: El suelo es un sistema abierto. Esta permeabilidad repercute en la mayor o menor facilidad de degradación.

Toda esta definición del concepto suelo aún puede ser completada desde un punto de vista sociológico, ya que sobre él se desarrolla gran parte de la actividad humana del planeta, así como casi toda la que nos concierne a nosotros como especie en muchos ámbitos, ya sea urbanístico, estructural, cultural, de ocio y sin menoscabar la visión económica y de seguridad alimentaria a través de las producciones agrícola, forestal y ganadera que suponen, por un lado la base de producción de combustibles, fibras, medicamentos, piensos y por supuesto de nuestra propia alimentación, así como de las especies con las que compartimos el concepto de terrestre, ya sean consideradas silvestres, cinegéticas o ganaderas; por otro lado, representa los pilares o sectores base de la pirámide macroeconómica de cualquier sociedad conocida a día de hoy.

De hecho, se estima a *grosso modo* que el 97% de la producción alimentaria mundial proviene de la agricultura y la ganadería desarrollada sobre los suelos, contra el restante 3% aproximado, de origen oceánico o de cualquier otro sistema acuático, por lo que el control de la degradación del suelo para el desarrollo de un medio ambiente y una agricultura sostenible se ha tornado esencial para todos los programas de seguridad alimentaria y conservación del medio (Pimentel, 1993).

También tiene una importancia sociológica el hecho de que se considere al suelo como un registro de la actividad humana pasada, ya que la gran mayoría de los restos arqueológicos se hayan enterrados a diferentes profundidades en el suelo. Por otro lado los suelos se relacionan con muchos ámbitos diferentes del desarrollo sostenible tales como reducción de la pobreza, erradicación del hambre, crecimiento económico y protección del medio ambiente. Además otra gran preocupación social es el cambio climático y los suelos ayudan a combatir y adaptarse a él debido a su papel clave en el ciclo del carbono, siendo capaces de secuestrar o absorber carbono de la atmósfera y almacenarlo con la consiguiente disminución de dióxido de carbono que pueda contribuir al cambio climático.

Desde todos los conceptos expuestos hasta el momento es que surge el reconocimiento de la gran importancia de los suelos, y es por ello, que cualquier degradación en la calidad del recurso suelo puede tener un impacto considerable en la capacidad de los suelos para realizar esta importante gama de funciones clave.

Por degradación del suelo entendemos "la reducción de su capacidad para proporcionar bienes y servicios ecosistémicos y garantizar sus funciones durante un período de tiempo para los beneficiarios de los mismos. La degradación del suelo se manifiesta de diversas formas: erosión del suelo, salinización, agotamiento de los nutrientes, pérdida de la biodiversidad del suelo, contaminación, compactación, pérdida de materia orgánica, o sellado del suelo, entre otras" (FAO, 2015). Otra definición es "la degradación del suelo se refiere a los procesos inducidos por las actividades humanas que provocan la disminución de su productividad biológica o de su biodiversidad, así como de la capacidad actual y/o futura para sostener la vida humana" (Oldeman, 1998).

Principalmente se asume que la degradación del suelo afecta a la productividad agrícola y ganadera disminuyendo sus rendimientos, y por ende a la seguridad alimentaria, porque es el proceso más directo y obvio, pero los efectos de la degradación a menudo tienen más impactos significativos que suelen pasar desapercibidos, al comprometerse la seguridad alimentaria, la competencia por la disminución de recursos aumenta y puede ser la causa potencial de un conflicto, aunque sólo sea del tipo migratorio, igualmente al agotarse los recursos las especies salvajes se desplazan desequilibrando nichos ecológicos ya estables pudiendo provocar disminuciones en la biodiversidad o incluso extinciones de determinadas especies endémicas.

También se comprometen las infraestructuras humanas a diferentes niveles ya que la degradación promueve una mayor movilidad y redistribución de los sedimentos, nutrientes y contaminantes como ya veremos, lo que será argumentado en el siguiente capítulo, dedicado a la erosión.

Por tanto, "la degradación de tierras es, en su sentido más amplio, uno de los principales problemas que enfrenta el planeta" (SEMARNAT, 2014). Las causas de la degradación son muy variadas, pero simplificando se puede argumentar que son resultado de procesos naturales, o antrópicos o una combinación de ambos, aunque rara vez es un solo factor el que desencadena un problema de degradación. Si bien es cierto que en algunos paisajes los suelos pueden ser más erosionables o la precipitación más erosiva, en prácticamente todos, el factor preponderante recae en las actividades humanas (INE-SEMARNAT, 2007)

Como ya se ha citado son varias las manifestaciones de degradación de los suelos, pero todas pueden ser agrupadas en dos grandes categorías, una referida al levantamiento y transporte de las propias partículas y materiales del suelo, donde se emplazan la erosión hídrica y eólica, que podría ser considerada una degradación física; y otra que pone de relieve, sin que haya desplazamiento, el deterioro de las cualidades y propiedades intrínsecas del suelo, físicas, químicas y biológicas, donde se agrupan el encostramiento, la compactación y el deterioro de la estructura del suelo (físicas), la pérdida de nutrientes, la contaminación, la acidificación, la salinización y la sodificación (químicas), la pérdida del banco de semillas, la disminución de la materia orgánica y de la macro y microfauna y flora del suelo (biológicas).

Cabe mencionar que igual que los factores causantes de deterioro suelen actuar en grupo, las manifestaciones también se encuentran intrínsecamente relacionadas entre sí, por lo que un proceso que inicia favorece o condiciona que se den los siguientes alterando el equilibrio mencionado del suelo a mayor grado y produciendo una espiral descendente que conducen a un daño permanente y en muchos casos irreversible.

Unas de las causas más frecuentes del inicio del deterioro es una combinación del clima y la deforestación para uso agrícola y/o el posterior abandono de esas tierras agrícolas, y una de las manifestaciones que encabeza la dinámica del proceso es la erosión, la cual suele desencadenar, tras remover la capa más superficial del suelo, la inestabilidad química y la debilidad biológica, lo que produce un aumento de los rangos de erosión a su vez y acelera el proceso (movimiento en espiral).

En México, recientes estudios llevados a cabo por el CONAFOR y la Universidad de Chapingo (2013), muestran que la degradación de los suelos nacionales está presente en 111.472 millones de hectáreas, o bien, el 63.02% del total nacional (Figura 1). La categoría de degradación ligera representa el 24.21% (47.433 millones de hectáreas), la moderada el 27.2% (53.291 millones de hectáreas), la severa el 10.01% (19.612 millones de hectáreas) y la degradación extrema el 1.59% (3.115 millones de hectáreas.), habiendo sido considerada la fragilidad de los suelos de acuerdo a su espesor y la pérdida del suelo por: 1) erosión hídrica, 2) erosión eólica, además de 3) degradación física expresada principalmente por la compactación y 4) la degradación química expresada fundamentalmente por la declinación de la fertilidad.

Hay que nombrar que estos datos se refieren sólo al factor edáfico, si se amplía al conjunto de "tierras", que integra consideraciones de índices de recursos bióticos, edáficos e hídricos de todos los ecosistemas del país (de acuerdo a la Ley de Desarrollo Rural Sustentable, LDRS, 2001) se arrojan resultados del 90.7% de la superficie nacional con degradación de tierras (CONAFOR-UACH, 2013)

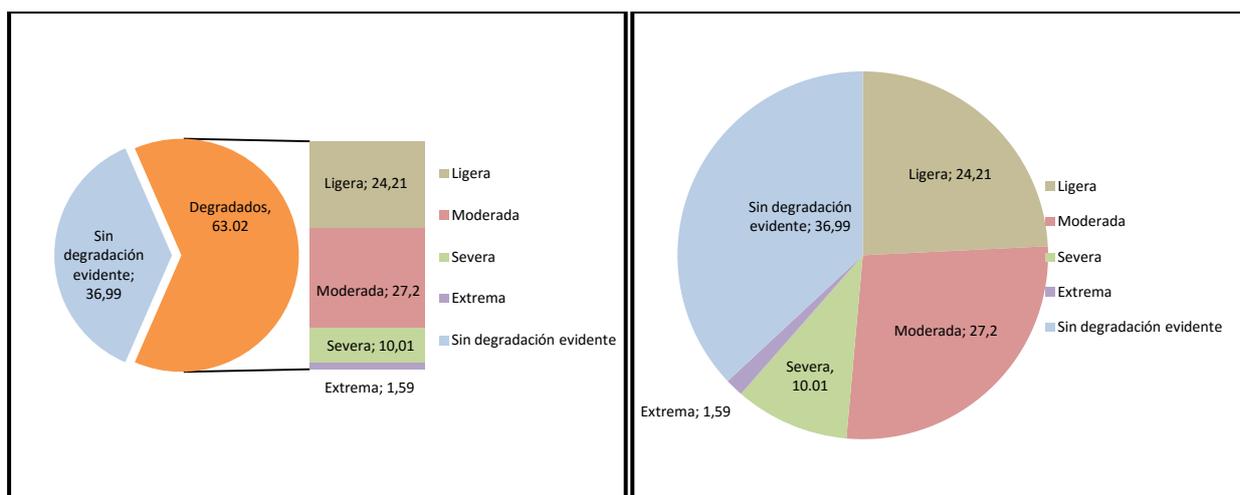


Figura 1. Situación de degradación de los suelos nacionales (recurso edáfico), México. Con estas gráficas se aprecia la gran presencia de degradación de suelos en México, que representa el 63.2% de la superficie total del país. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos arrojados en CONAFOR-UACH, 2013.

De este modo es, que la erosión del suelo se ha posicionado hoy día como uno de los principales problemas ambientales y de seguridad alimentaria en todo el planeta.

Dentro de los procesos erosivos, la erosión hídrica que es el tema central de esta tesis, es una de las más agresivas y presentes en México (Figura 2), y puede ser definida como el desprendimiento de partículas del suelo bajo la acción del agua, dejándolo desprotegido y alterando su capacidad de infiltración, lo que propicia el escurrimiento superficial (SEMARNAT, 2014).

De los parámetros que ayudan a evaluar la erosión hídrica, la erodibilidad del suelo, que podría ser definida como el factor o conjunto de factores intrínsecos de un determinado suelo que condicionan y generan la resistencia del suelo a ser erosionado por los agentes erosivos, es considerada uno de los más importantes ya que se ha demostrado que a igualdad de condiciones externas determinados suelos se erosionan con mayor facilidad que otros.

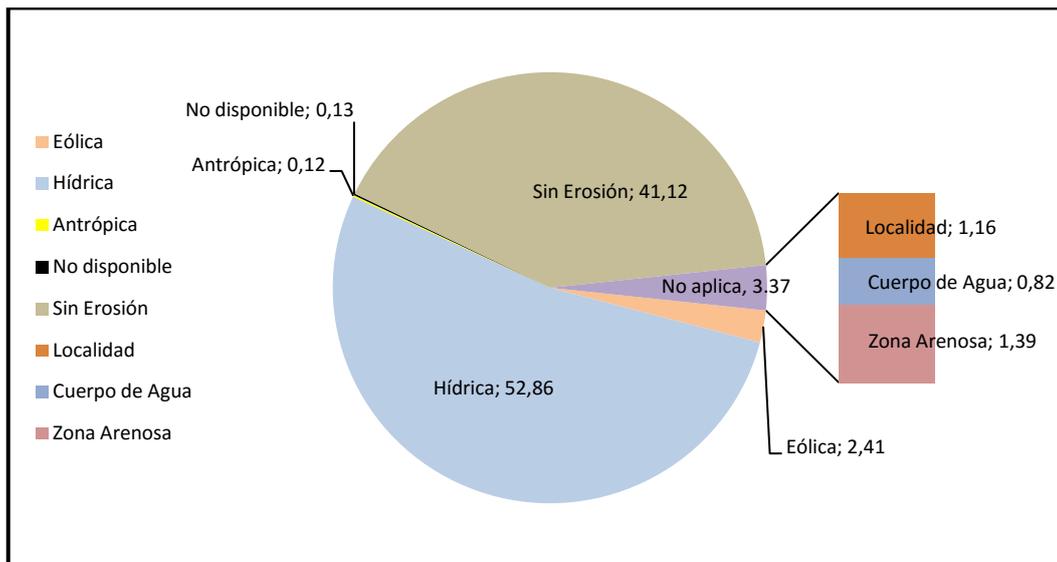


Figura 2. Porcentaje de los tipos de erosión presentes en México en 2014, respecto al total de la superficie del país. Como se aprecia en la gráfica la erosión hídrica es por mucho la situación de mayor presencia en México. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de SEMARNAT, 2014

En este sentido es que nace el interés de este proyecto por la erosión hídrica, la evaluación de la erodibilidad y el modelado del proceso, ya que es el tipo de erosión más evidente y comprometedor, pues alcanzado un límite de desarrollo es casi irrecuperable a no ser que se practiquen drásticas y costosas remediaciones casi siempre del tipo ingenieril o tipo *land leveling*, con los consecuentes impactos que esto puede generar.

En sí, el proyecto pretende la evaluación numérica de la erosión hídrica actual de las zonas estudiadas, para lo que se usó un modelo comprobado internacionalmente (MPSIAC), pero innovador en México, ya que no se han encontrado evidencias de haber sido usado en el país, motivo por el que fue contrastado con otro modelo de amplio uso y comprobada eficacia a nivel nacional (RUSLE), para certificar los resultados. Del mismo modo también se realizó una evaluación novedosa de la erodibilidad, puesto que el *software* del algoritmo *KUERY1.4* de Borselli *et al.* (2012), tampoco ha sido usado en territorio nacional hasta este proyecto, y permite una mejora respecto a otros métodos de evaluación, al contar con el factor climático de las áreas de estudio. Así pues el proyecto fue conducido a través de un desarrollo metodológico clásico, con trabajo de campo, laboratorio y gabinete, poniendo especial atención a la caracterización del suelo física y química, para que los parámetros de cálculo de ambos modelos contrastados se asienten, y generen resultados, sobre una base científica sólida.

Además se encontraron la necesidad y la oportunidad ya que el proyecto se pudo desarrollar a través de los fondos concurrentes del proyecto superior financiado de nombre "*Estudio geotécnico e hidrológico para la evaluación del peligro geomorfológico de la sierra de San Miguelito, San Luis Potosí, SLP, México*" (PROMEP uaslp-ptc-372), que se venía desarrollando en el Laboratorio de Geomecánica del Instituto de Geología de la UASLP.

A.2. Hipótesis

Si la erosión hídrica es un potente modificador de la geomorfología, y la erodibilidad uno de los principales factores determinantes en la evaluación de la erosión hídrica, un modelado de este tipo de erosión a través de la estimación de la erodibilidad, puede ayudar a comprender, determinar y evaluar los procesos y modificaciones que ha sufrido un área y establecer predicciones futuras del comportamiento mostrado, así como posibles peligros derivados de estos comportamientos.

A.3. Objetivos

Los objetivos del presente trabajo se establecieron en dos categorías, diseñadas ambas con la clara intención de haber sido alcanzadas en la conclusión de los estudios

A.3.1. Objetivo General

- Evaluar el proceso erosivo a través de dos modelos propuestos de erosión hídrica, de manera que la evaluación sea transportable a zonas de similares características y permita la predicción de los comportamientos futuros en las áreas de estudio

A.3.2. Objetivos Específicos

- Hacer una caracterización geomorfológica de los procesos de erosión hídrica en cárcava e inter-cárcava sobre las áreas de estudio seleccionadas
- Evaluar la estabilidad geomorfológica, física y química de los suelos, el grado de erosión potencial y la movilidad de sedimentos que puedan generar los procesos erosivos
- Determinar las características de erodibilidad de los suelos a través de una evaluación de la erodibilidad por erosión hídrica con el software *KUERY1.4* según Borselli *et al.* (2012)
- Mostrar una comparativa entre diversos modelos diseñados por cuenta propia con algún/os modelo/s ya utilizados y comprobados internacionalmente a fin de estimar y verificar su validez y exactitud

A.3.3. Metas

- Realizar todas las medidas de los parámetros necesarios para poder realizar una caracterización precisa del suelo, tanto físicas como químicas, de modo que los cálculos para el modelo resultante gocen de la máxima exactitud posible
- Elaborar todos los mapeos necesarios para ubicar, exponer y definir el área de estudio, así como aquellos que determinen las condiciones existentes previas a la investigación y finalmente producir los mapas-resultado donde se expongan las conclusiones alcanzadas sobre la distribución espacial de las propiedades de los suelos, la distribución de la conectividad hidrológica y la distribución de los resultados de erodibilidad de las áreas de estudio
- Aplicar el modelado de erosión hídrica con una temporalidad de evento anual

1. La erosión, la erosión hídrica y la erodibilidad como parámetro fundamental

1.1. La erosión

La erosión del suelo es la cantidad de suelo retirado por la acción dispersante de un agente erosivo. Está estrechamente vinculada con la desertificación y el cambio climático, la pérdida de la biodiversidad, acentuando los índices de pobreza y migración, disminución de la productividad del suelo, incrementando la frecuencia de eventos extremos como lluvias torrenciales, abandono de tierras por efectos de la sequía y desertificación (INEGI, 2014a). Otras definiciones son:

- ~ "La erosión del suelo es definida como un proceso de degradación transporte y deposición de materiales del suelo por efecto de agentes erosivos, tales como el agua y el viento o el hielo" (Peralta, 1993)
- ~ "Si este proceso se lleva a cabo en condiciones naturales se denomina erosión geológica, pudiendo ser considerada en tal caso, como una forma más de conformación del relieve. Si la erosión se incrementa por las actividades humanas se manifiesta la erosión acelerada o inducida" (Figueroa *et al.*, 1991)
- ~ "La erosión del suelo se refiere a una serie de procesos que conducen al agotamiento del suelo *in situ* y la exportación de sedimentos en dirección a las zonas bajas" (Borselli, 2006)
- ~ "La erosión del suelo es un proceso físico que consiste en la pérdida del estrato más superficial del terreno, el suelo, por causa de la acción de los agentes naturales como el viento y el agua. Desde el punto de vista geológico, junto a otros fenómenos superficiales, la erosión es responsable de la dinámica de la superficie terrestre, determinando una continua remodelación" (Bazzofi, 2007)

El problema de la erosión de los geomateriales que observamos en nuestro paisaje a diario no es algo reciente, geológicamente los procesos erosivos "han estado activos durante todo el tiempo geológico y han dado forma al paisaje actual de nuestro mundo" (Julien, 2010), en nuestra civilización data desde que el hombre comenzó a ser agricultor, y existen referencias desde los principios de la lengua escrita, por ejemplo, Platón ya describía la destrucción del suelo (erosión) como las deforestaciones (García y Dorransoro, 2007, citado en Jasso *et al.*, 2009), ahora bien, más recientemente este antiguo problema lleva más de medio siglo siendo discutido entre académicos e investigadores de todos los ámbitos y ciencias que incluyen el recurso suelo. Quizá una de las grandes cuestiones es la que se cita en Pimentel (1993) con respecto a la poca apreciación de la problemática, "la erosión del suelo se está produciendo a gran escala de una manera descontrolada en todo el mundo, debido a una conservación mínima. Esto es en parte por causa de que la cantidad de suelo que se erosiona con cada tormenta, de lluvia o viento, es casi imperceptible. Por ejemplo, 15 toneladas de suelo perdido en una hectárea de tierra durante una sola tormenta elimina tan sólo alrededor de 1 mm de suelo de la superficie". Aunque 1 mm de suelo parece poco, es fácil imaginarse lo que ocurre si las 15 toneladas se acumulan en un punto físico determinado y los problemas que surgen de este hecho. Las consecuencias de la erosión pueden llegar a ser catastróficas en un amplio sentido, abarcando muchos ámbitos y pudiendo ocasionar pérdida de vidas humanas.

Por otro lado, los tipos de erosión del suelo se pueden clasificar según el agente activo o según el carácter de la intervención ya sea humana o natural (Figura 3).



Figura 3. Tipos de erosión según el agente activo y su carácter. Fuente: Elaboración propia

Según el agente activo la erosión suele producirse a través de los dos agentes principales de intemperización de la corteza terrestre, el agua y el viento, denominándose erosión hídrica cuando es producida por el primero (o glacial si el agua está en su estado de congelación) y erosión eólica cuando se produce a través del segundo. La erosión es un ciclo que comprende la remoción de partículas, el transporte y la deposición o sedimentación, de manera que con el tiempo lo depositado se erosiona y comienza de nuevo el ciclo.

Existen factores naturales que pueden potenciar estas situaciones, como es el caso de la topografía muy accidentada entre lomas cerros, montañas y sierras que se extiende por gran parte de México, pero se debe hacer hincapié en que el ser humano siempre ha contribuido a acelerar los procesos erosivos naturales por medio de diferentes causas, como son:

- Deforestación
- Mal uso de la capacidad del suelo
- Sobre pastoreo
- Sobreexplotación de la vegetación natural para uso doméstico
- Prácticas inadecuadas del manejo de suelos
- Infraestructuras viales, urbanas, hidrológicas, etc., mal diseñadas o que producen el sellamiento de las zonas de percolación.

Los procesos erosivos del recurso suelo, ya sean hídricos o eólicos, se manifiestan afectando principalmente a los horizontes superficiales, donde los ciclos biogeoquímicos favorecen la concentración de la materia orgánica, los nutrientes y una alta diversidad de microorganismos, todos indispensables para el sostenimiento de la vida.

Los problemas que genera la erosión pueden ser observados a nivel interior (*in-situ*) y exterior (*off-situ*) al lugar donde se produce, por un lado el nivel interior puede acusar al interés privado, donde es el dueño de la tierra el principal afectado, o al interés público, donde el conjunto de la sociedad puede resultar perjudicada si el lugar donde se produce el fenómeno es de carácter público, pero por otro lado el nivel exterior siempre suele ser en detrimento del conjunto de la sociedad, ya que suele originar problemas de sedimentación, contaminación difusa, atascos o azolves de cauces, conducciones hídricas y presas con las consecuentes inundaciones, contaminación de acuíferos y ecosistemas fluviales, eutrofización, pérdida de biodiversidad, contribución al cambio climático, etc.

Es importante contemplar que si la tasa de erosión de suelos es mayor que la tasa de formación del mismo, lo que suele ocurrir, nos encontramos en un balance negativo y lo que se denomina "pérdida de suelo" que puede llegar a ser peligroso a nivel de colectivos humanos, con consecuencias que pueden repercutir negativamente incluso sobre variables macroeconómicas, poniendo en peligro la estabilidad económica de los diferentes niveles político-administrativos. Por esto se llegó a un concepto conocido como la "Tasa tolerable de pérdida de suelo" o "valor T" (Tabla 1) en la literatura especializada, también conocido localmente en México como Límite Permissible de Erosión o LPE, que puede ser definido como el rango de erosión actual que no deteriora, menoscaba o elimina una o más funciones del suelo, otra definición aceptada ampliamente es el "máximo nivel de erosión del suelo que permite un elevado nivel de productividad del cultivo, sostenible económica e indefinidamente" (Wischmeier y Smith, 1978).

En general esta tasa o límite se basa en varios aspectos como son: que las pérdidas de suelo sean iguales o menores a la velocidad de formación del suelo, que las pérdidas de suelo se mantengan a un nivel que evite la formación de cárcavas y que las pérdidas de suelo permitan mantener una profundidad adecuada para sostener una productividad en el tiempo (Loredo-Osti *et al.*, 2007).

En México existen muchos antecedentes sobre estudios de erosión, la mayoría de ellos a escala detallada, conceptualmente heterogéneos y únicamente en áreas específicas del país (INEGI, 2014a).

Según datos de INEGI (2014) y de acuerdo a los resultados obtenidos para erosión hídrica, el área afectada es de 1,027,611.5 Km² de los cuales el mayor exponente se da en erosión del tipo laminar o superficial con 923,667.75 km², seguida de la erosión en surcos 65,252.61 km² y en cárcavas con 38,691.14 km², representando cada una de ellas un porcentaje igual al 47.51%, 3.36% y 1.99% respectivamente, suponiendo así más del 50% (52.86%) de la superficie territorial del país (INEGI, 2014).

Tabla 1. Pérdida de suelo tolerable (Valor T) en un terreno según profundidad y material parental Fuente: USDA-SCS (1977). Departamento de Agricultura de los EE.UU. Servicio de Conservación de Suelos

Profundidad del Suelo (cm.)	Material parental	Valor T (Ton/ha/año)
>100	Rocoso	11.2
>100	Arena o grava	11.2
50-100	Rocoso	9.0
50-100	Arena o grava	9.0
25-50	Rocoso	4.5
25-50	Arena o grava	6.7
10-50	Lecho arcilloso	6.7
<25	Lecho rocoso	2.2
<25	Arena o grava	4.5
<25	Lecho arcilloso	4.5

También cabe destacar que la erosión en cárcava se considera un grado de erosión que va de extremo a fuerte y puesto que la erosión en surco puede considerarse como el principio de la erosión en cárcava, ya que la diferencia arbitraria entre uno y otro tipo se da al traspasar el límite de área en la sección vertical de corte igual a 0.0929 m^2 (Hauge, 1977; Poesen *et al.*, 2003; citados en Borselli, 2011) se aclara la cifra de 65595.16 km^2 de erosión extrema y fuerte que data INEGI.

A continuación se pueden apreciar los porcentajes que suponen todas estas cifras de una manera más gráfica, dentro del marco nacional de México (Figura 4).

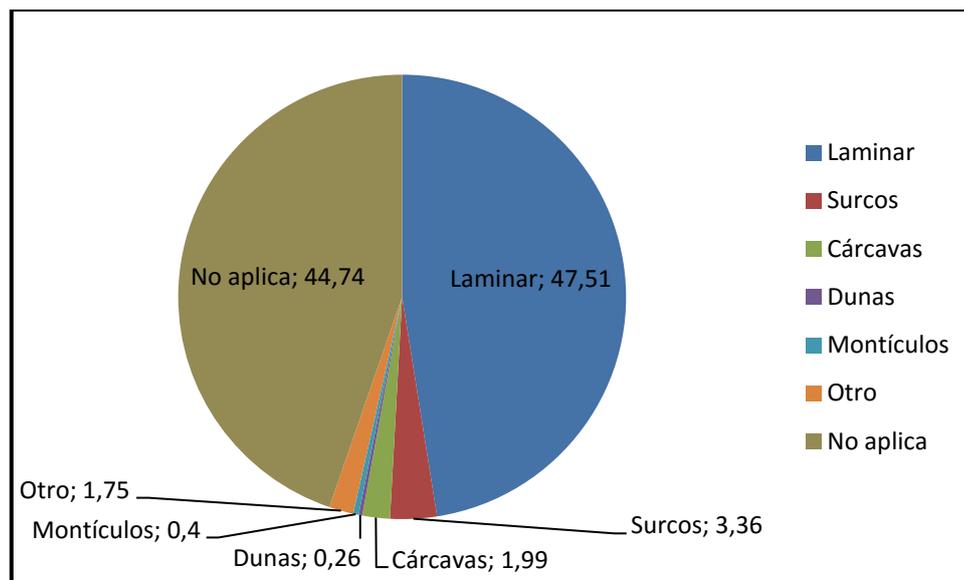


Figura 4. Porcentaje de las formas de erosión presentes en México a 2014. Como se observa la erosión hídrica (laminar, cárcavas y surcos) representa un porcentaje mayor al 50% de la superficie total del país. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de INEGI 2014

1.2. La Erosión Hídrica

Ocurre cuando el agente erosivo causante de la erosión es el agua en sus diversas formas, por ejemplo el impacto de gotas de lluvia, granizadas, encharcamientos, las formas de escorrentía como arroyadas, torrenteras, crecidas de ríos, riegos tradicionales (a manta), etc. Se considera un agente muy enérgico ya que rápidamente provoca la degradación del suelo, que suele llegar acompañada posteriormente de una compactación del suelo y un encostramiento superficial que puede generar condiciones de desertificación.

"La erosión hídrica es el desprendimiento de partículas del suelo bajo la acción del agua, dejándolo desprotegido y alterando su capacidad de infiltración, lo que propicia el escurrimiento superficial" (SEMARNAT, 2014).

"La erosión hídrica del suelo se lleva a cabo a través por tres procesos principales: primero por humectación y desprendimiento (*detachment*) de partículas del suelo, agregados, terrones, y grandes

volúmenes de suelo de la masa del suelo; segundo por el movimiento del material desprendido (por ejemplo, por gravedad o por flujo superficial); y tercero por la deposición" (Borselli, 2012).

Este proceso triple también se conoce como el ciclo de erosión hídrica y puede subdividirse en cinco tipos o formas:

- erosión por golpeteo, salpicadura o impacto de las gotas (*splash erosion*)
- erosión superficial difusa o laminar (*sheet erosion*)
- erosión lineal o concentrada, en surcos o canalillos (*rill erosion*) y cárcavas (*gully erosion*)
- erosión subterránea por minado, en tuberías y galerías (*pipe erosion*)
- movimientos en masa superficiales (*mass movements*)

Durante el desarrollo de todos estos tipos de erosión hídrica, es muy común que se produzcan estructuras que ayudan a reconocer el estado inicial del suelo pre-erosionado y por tanto a hacerse una idea del grado de severidad del proceso, conocidas como "testigos de erosión". Estos remanentes se producen generalmente porque tienen unas condiciones de resistencia mayores que las que les rodean, aunque con el paso del tiempo, pueden ser completamente erosionados y desaparecer.

- Pedestales: son promontorios más elevados que la superficie del terreno circundante que por medio de piedras o raíces de un árbol u otras plantas, quedan protegidos del impacto de las gotas de lluvia y aislados. Se asocian a la erosión por el impacto de las gotas, por lo que se desarrollan lentamente a través de los años y se localizan generalmente en manchones desnudos de terrenos con vegetación aislada.
- Pináculos: se asocia siempre con canales verticales profundos a los lados de las cárcavas que profundizan rápidamente hasta que se juntan y dejan al pináculo aislado. Suelen estar coronados de rocas o gravas, incluso a pequeña escala en muchas ocasiones soportan una única roca. Son producto de los flujos hídricos.
- Islas: es el terreno aislado que suele quedar entre las bifurcaciones de cárcavas que la rodean, donde se aprecia completamente el perfil del suelo y que en muchos casos posee la vegetación originaria del área donde se producen, la cual es la que otorga el factor de resistencia.

Igual que en el apartado anterior fue citado, los impactos generados por la erosión hídrica también se manifiestan en el lugar donde ocurre el fenómeno (*in-situ*) y fuera de dicho lugar (*off-situ*) con las mismas consecuencias ya expuestas, aquí relatadas en forma de cuadro de forma más extensa (Tabla 2).

Tabla 2. Consecuencias de los impactos generados por la erosión hídrica a diferentes niveles. Fuente: INE-SEMARNAT, 2007, Gaceta Ecológica N° 83, Cuadros 1 y 2.

Principales consecuencias de la erosión hídrica a nivel <i>in-situ</i>	Principales consecuencias de la erosión hídrica a nivel <i>off-situ</i>
Pérdida de la estructura del suelo, ocasiona: <ul style="list-style-type: none"> • disminución de infiltración y retención de agua • aumenta erodibilidad del suelo • aumenta riesgo de compactación del suelo 	Incremento de sedimentos: sepulta cultivos bajos y suelos en partes bajas, afecta infraestructura (casas, pistas, carreteras), azolva presas, lagos, estuarios y canales de riego
Pérdida selectiva de partículas: partículas finas y materia orgánica	Altera la red de drenaje hidrológica (dificultad en navegación) Contaminación de aguas marinas
Pérdida de nutrientes: disminuye productividad, aumento de costo de producción	Aumenta riesgo de inundaciones por acarreo de material sólido de diferentes fuentes (basureros, jales, aguas negras) que constituyen fuentes de infección
Disminución de profundidad del suelo: pérdida de función de soporte	Contaminación por metales pesados y componentes orgánicos (provenientes de pesticidas)
Disminución de la calidad del suelo <ul style="list-style-type: none"> • dificulta el establecimiento de nuevas plantaciones • afecta la biodiversidad (interna y externa) • Inversión de horizontes, materiales inertes sobre horizontes fértiles 	Disminuye la vida de presas <ul style="list-style-type: none"> • Reduce la capacidad de generación hidroeléctrica • Incrementa el costo de purificación del agua • Aumenta turbidez del agua y eutrofización • Reduce fotosíntesis y supervivencia de vegetación acuática • Degrada hábitat de peces y altera cadena alimenticia
Disminución de la recarga del acuíferos	Emisiones de gases invernaderos (CO ₂)

Del mismo modo que el recurso suelo y la erosión en general son estudiadas desde una amplia gama de disciplinas, la erosión hídrica también lo es, y cada una de estas disciplinas (Tabla 3) ha contribuido al conjunto de conocimientos relativos a la respuesta del suelo a los procesos de humectación por las gotas de agua y posterior desprendimiento, infiltración y escorrentía (Greene y Hairsine, 2004).

En la erosión hídrica se debe tener muy en cuenta el concepto de cuenca hidrográfica (o cuenca de captación), puesto que va a ser la unidad mayor territorial sobre la que realizar cualquier estudio. Una cuenca es toda área limitada por un parteaguas y drenada por una corriente o por un sistema de corrientes cuyas aguas concurren en un punto de salida. (SARH, 1977). En la cuenca existen factores ecológicos, climatológicos, hidrológicos, socio-económicos y culturales que se interrelacionan entre sí, dando a cada cuenca su propia dinámica. Si el estudio no tiene un carácter regional el área seleccionada debe ser o formar parte de una microcuenca, que se define como la parte de una cuenca considerada como la unidad de acción y planeación de acciones (Loredo-Osti *et al.*, 2007).

Tabla 3. Diferentes puntos de vista desde los que estudiar la erosión hídrica. Fuente: Modificado de Greene y Hairsine (2004)

Puntos de vista	Atributos que contribuyen a la erosión hídrica del suelo
Química del suelo	Efectos de la química de las arcillas en la hinchazón, la dispersión / floculación Estabilidad de los agregados y como es afectada por la materia orgánica Sodicidad y salinidad Desmoronamiento (<i>Slaking</i>) y efectos de la tasa de humectación
Física del suelo	Conductividad hidráulica de las capas superficiales Formación de costra superficial / sellado Desmoronamiento estructural (<i>Slaking</i>) Infiltración / escorrentía Balance de agua
Mecánica de la erosión	Infiltración / escorrentía Desprendimiento / transporte Conectividad de flujos a nivel cuenca Concentración de sedimentos Erodibilidad del suelo

Por otro lado en un estudio elaborado por Cotler *et al.* (2011), se realizó una valoración económica de la erosión de suelos en México buscando aproximarse al costo de sólo dos servicios ambientales que otorga el suelo: el mantenimiento de la producción a través de la profundidad del suelo y la presencia de macronutrientes, lo cual indudablemente no abarca el valor del suelo como sistema natural. Se cita el costo de la pérdida económica atribuida como de 38.3 a 54.5 USD\$/ha, según sea escenario conservador o escenario crítico, alcanzando un valor para el éste último escenario de 89,843,089 USD\$ en la pérdida de rendimiento productivo más 18,545,637 USD\$ para la pérdida de nutrientes, sumando un nada despreciable total de 108,388,726 USD\$ para un área de estudio de 27,773 Km², lo que tan sólo supone un 1.4% del territorio nacional. Con estos datos conviene hacerse una idea, extrapolando para las cifras ya citadas de erosión hídrica total nacional, y meditar sobre los elevadísimos costos que supone y los posibles remedios para dichas pérdidas.

Al ser la erosión hídrica el tema central de esta tesis se hace necesario una buena descripción del proceso que como ya se nombró es cíclico y dinámico, pero también constante a través del tiempo.

1. El ciclo de erosión hídrica comienza con los eventos de precipitación y una humectación del suelo a ser erosionado; la agresividad del proceso de humectación viene determinada por la energía cinética que lleva el agua al alcanzar el suelo: no es lo mismo una tormenta de gran intensidad, un granizo o la ruptura de una presa aguas arriba, que una llovizna de gotitas finas o un encharcamiento lento, o también que las gotas sean frenadas por un vegetación existente o que la superficie esté desnuda y se produzca el impacto directo (*splash erosión*). El hecho es que esta agresividad provoca el desprendimiento (*detachment*) de las partículas superficiales y determina la cantidad y tamaño de las mismas. En este proceso inicial también juegan un papel importante el tiempo (duración y frecuencia de los procesos) y otros factores intrínsecos del suelo, como su factor de resistencia a ser erosionado, es decir su erodibilidad, la cual está determinada por sus propiedades mecánicas y relaciones estructurales, ya que las primeras gotas en alcanzar la superficie aunque desprendan partículas (*detachment*) y las dejen

preparadas para que completen el ciclo, no suelen producir el transporte; más bien para que esto ocurra, se necesita que el suelo alcance su condición de saturación máxima o supere la velocidad de infiltración, momento en el que se debilitan las conexiones estructurales físico-químicas de los agregados superficiales, produciéndose, debido a las fuerzas del agua, una compresión del aire atrapado en los poros, que impulsan a la disgregación de las partículas del suelo (fenómeno conocido como *slaking*), y comienza el flujo, conocido como flujo Hortoniano, produciendo el arrastre. El flujo superficial Hortoniano se define como la escorrentía superficial directa, donde la intensidad de lluvia supera la máxima velocidad de infiltración en cada pendiente (Miyazaki, 2006), no teniendo por ello que haber superado la máxima capacidad de infiltración, esto se debe a que sobre una superficie plana máxima capacidad y velocidad de infiltración son iguales, pero en pendientes o laderas la máxima velocidad de infiltración es ligeramente menor.

Por ello si la humectación no supera la capacidad o velocidad de infiltración del suelo no se suele producir el arrastre, a esto se le conoce como tiempo de encharcamiento (*ponding time*) ya que cuando aparecen los primeros charcos sobre el suelo la infiltración ha cesado y comienza la siguiente fase (escorrentía). De aquí se desprende que las diferentes clases texturales y la profundidad también juegan un papel importante, así como otros factores físicos como el grado de compactación, presencia de costra, etc., y bióticos como cubierta vegetal aérea, porcentaje de suelo cubierto, porcentaje de materia orgánica, tipo y profundidad de las raíces, etc.

2. El segundo proceso o fase del ciclo sería el movimiento o arrastre del material desprendido, la conocida escorrentía, en dirección siempre aguas abajo por gravedad, siendo dependiente principalmente de la infiltración y de factores topográficos como la pendiente y la longitud del recorrido, pero también de otros como la rugosidad superficial del terreno, la rocosidad superficial y el porcentaje de rocas parcialmente embebidas, el grado de compactación del perfil, la presencia de costra, la infiltración específica de las áreas recientemente invadidas en el movimiento y las diferentes clases texturales y profundidades. Todos estos factores lo que determinan es una capacidad de transporte precisa para un área designada, la cual establece un flujo (Hortoniano) con una carga de sedimentos discontinuos, que adquieren una energía cinética y velocidad concretas viajando en un ciclo continuo de deposición y arrastre (Figura 5). Es decir, las partículas que se desprenden en la cabecera de una ladera pueden alcanzar o no el área final de deposición, ya que pueden quedar depositadas por el camino, condicionadas a ser arrastradas o no en posteriores flujos. Cabe denotar que cuanto mayores sean las cargas hídricas y de sedimentos del flujo, mayores serán las fuerzas que ejerce sobre la superficie, aumentando así la capacidad de arrastre y transporte, y por tanto la capacidad de erosionar dicha superficie.

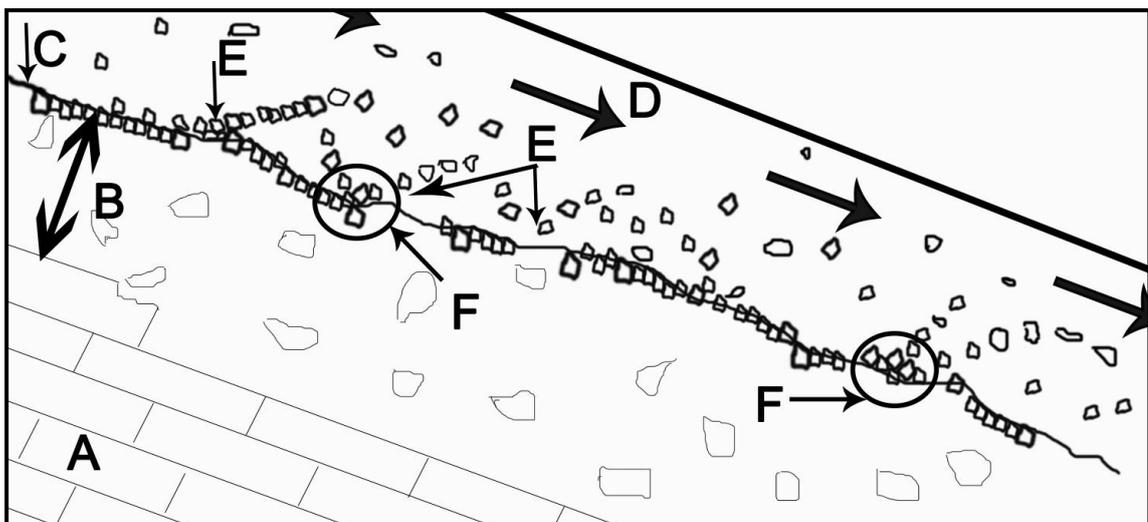


Figura 5. Proceso de la erosión hídrica, flujo con carga de sedimentos. Leyenda de la imagen: A: material parental; B: perfil del suelo; C: superficie del suelo sobre la que se produce el fenómeno erosivo; D: Flujo con carga de sedimentos y dirección del mismo; E: áreas de desprendimiento de partículas del suelo, posterior flotación y arrastre; F: zonas eventuales de deposición. Como se aprecia las zonas de deposición también se convierten en zonas de desprendimiento. Fuente: elaboración propia

Es precisamente la forma en que se desarrolla esta fase la que define los tipos o formas de erosión hídrica ya expuestos en este texto, si el flujo se da como una capa más o menos fina de límites difusos cubriendo la mayoría de la superficie, tendremos erosión laminar; si por el contrario el flujo se concentra formando canales que con el tiempo se van ensanchando hasta formar cárcavas tendremos la erosión lineal o concentrada. Si el flujo llega a una represa y se infiltra formando galerías, se producirá una erosión subterránea y si en su camino el flujo se infiltra por grietas y alcanza mayores profundidades provocando la inestabilidad de toda una ladera tendremos la erosión por grandes movimientos de masas.

De todos estos tipos de erosión se podría decir que la laminar es la forma más silenciosa ya que se necesitan largos tiempos y muchos eventos para ser captada por el ojo humano, las más peligrosas podrían ser las formas subterránea y de movimiento de grandes masas, puesto que, dependiendo de varios factores, puede acarrear consecuencias catastróficas incluso con pérdida de vidas humanas, al liberar grandes cantidades de flujos por ruptura de represas y desprendimiento de laderas, que pueden llegar a hiperconcentrarse o convertirse en flujos de escombros, y arrasarlo con todo lo que se interponga en su camino. La forma más visible y alarmante de erosión es la lineal o concentrada, ya que evidencia un estado avanzado del proceso erosivo y "la presencia de cárcavas, originadas por procesos severos de erosión hídrica, es considerada como uno de los principales indicadores de desertificación" (Maldonado-Hernández, 2001).

Un factor importante durante esta fase es la conectividad hidrológica (de flujos) a nivel de cuenca de captación, que es el término comúnmente utilizado para describir los vínculos internos de conexión entre las fuentes de escorrentía y sedimentos de las partes altas de las cuencas con las zonas de deposición correspondientes; es decir, la conectividad de flujos en el paisaje, actúa como una vía de transferencia rápida de agua y sedimentos desde las zonas altas a las bajas. Se identifican dos tipos de conectividad: primero por conexión directa a través de nuevos canales o cárcavas y segundo una conectividad difusa dependiente de como la escorrentía alcanza la red de flujos a través de vías de flujo superficial. Estas zonas de escorrentía donde se conectan y concentran los flujos son puntos críticos en el paisaje en los que se pueden desarrollar cárcavas y por tanto, producirse la erosión de grandes cantidades de sedimento. La conectividad no sólo depende de la fisiografía general de la cuenca, sino también de la organización espacial de las unidades fisiográficas presentes y de la conectividad interna entre ellas, así como de los tipos, tamaños y posición de los impedimentos que encuentra el flujo en la cuenca.

Cammeraat (2002, citado en Borselli *et al.*, 2008) indica los tres factores principales que influyen en la conectividad difusa:

1. La irregularidad de la superficie del suelo (rugosidad), la cual podría ser muy baja en la escala de parcela, pero superior en las escalas de ladera y de cuenca,
2. la organización espacial de la vegetación en la escala de ladera y la disposición espacial entre las unidades de tierra a escala de cuenca,
3. la intensidad de las precipitaciones, la duración del evento y por lo tanto la precipitación efectiva.

La conectividad total de flujos en una cuenca determinada cambia con los procesos que ocurren dentro de ella, al ir cambiando las fuentes de sedimentos y las vías de conexión entre ellas. El efecto del tiempo se relaciona principalmente con las características de magnitud y frecuencia de los procesos de transferencia de sedimentos y con la evolución temporal del uso y manejo de la tierra. No todos los eventos de precipitación van a generar vías de flujo que interconecten grandes partes de las laderas con los cauces principales o con las zonas de deposición o sumideros, para ello la magnitud del evento tienen necesariamente que superar unos umbrales controlados física y biológicamente, por las leyes de infiltración, arrastre y transporte de sedimentos y la presencia de cobertura vegetal, entre otras.

3. La última fase o proceso del ciclo contempla la deposición o sedimentación de todos los materiales arrastrados por el flujo erosivo, comúnmente llamados sedimentos, en un área de menor energía potencial y menor cota topográfica, sin perjuicio de que en un determinado

momento vuelvan a ser traslocados por un evento de mayor energía que el anterior que los depositó y se vuelva a producir el ciclo, hasta acabar posiblemente en un curso permanente de agua o el mar.

Es esta la fase que mayores consecuencias y/o riesgos acarrea para las infraestructuras humanas y para los ecosistemas naturales. En realidad se hace fácil imaginar la cantidad de situaciones indeseables que puede producir esta fase del ciclo además de las ya descritas con anterioridad en la Tabla 1 de este mismo apartado. Por un lado el azolvamiento de cursos fluviales, redes hídricas y presas traen consigo una enorme cantidad de problemas asociados de muy costosa remediación llegando en casos extremos a dañarse la capacidad de generación de energía eléctrica, por otro cuando no se produce este azolvamiento, el incremento de sólidos en los flujos (nutrientes, contaminantes y patógenos) genera un aumento de la turbidez, tanto en los cursos de agua como en las aguas subterráneas, modificando los ecosistemas hídricos y produciendo eutrofización y contaminación por metales y otros contaminantes asociados a las partículas que transporta, amenazando el hábitat y la salud humana. A este respecto, el costo de la eutrofización (incluida la pérdida de los suministros de agua potable, la reducción en el valor de la propiedad al agua, un descenso en el valor recreativo y de ocio de las masas de agua y los impactos sobre el agua para usos industriales y la pesca comercial), debida principalmente al enriquecimiento de fosfato, se estima en 128.5 millones de libras por año solo en el Reino Unido (Pretty *et al.*, 2000; citado en Owens y Collins, 2006).

Igualmente si los sedimentos no alcanzan cursos de agua, pueden sepultar zonas de interés, como áreas cultivables o ya cultivadas, zonas protegidas etc., e igualmente polucionar estas áreas haciéndolas inviables para usos productivos. Estos problemas reflejan la amplia importancia ambiental y ecológica de los sedimentos y han puesto de relieve la necesidad más amplia de incorporar estrategias efectivas de control de sedimentos en los programas de gestión de cuencas (Owens y Collins, 2006).

Conviene observar, con respecto a los tipos de erosión ya nombrados, que un área de estudio posiblemente se den todas o casi todas las formas de erosión durante un evento, es decir primero se dará la erosión por impacto de las gotas sobre la superficie hasta que se establezca un flujo, momento en que las gotas dejan de impactar contra la superficie directamente, en la mayoría del área se establecerá un flujo de tipo laminar y dependiendo de la microtopografía del lugar se concentrará ese flujo en determinadas ubicaciones y se formarán los surcos o canalillos y a su vez correspondiente a la macrotopografía se unirán los diferentes flujos para formar canales más anchos que podrán iniciar cárcavas o pasar a las cárcavas ya establecidas. También el discurrir del flujo por estas cárcavas ya establecidas va minando los laterales y el lecho de la misma hasta producir inestabilidad y colapso de las paredes del canal, que es la forma típica de crecimiento de las cárcavas.

1.2.1. Erosión hídrica laminar

Se entiende por erosión laminar a la pérdida uniforme de finas capas de suelo debido a la acción de un flujo homogéneamente distribuido sobre el terreno (Hillel, 1998, citado en Casalí *et al.*, 2009). Como ya fue citado es un tipo de erosión difícilmente observable por el ojo humano en cortos periodos de tiempo y por otra parte está muy relacionado a la erosión por el impacto de las gotas (*splash erosion*) y a los fenómenos que desestabilizan los agregados (como el *slaking*) puesto que ambos son los procesos que inicialmente disponen el material en forma de que pueda ser erosionado a través del flujo laminar. Desde el punto de vista de la energía, la erosión por las gotas de lluvia es muy importante, pues éstas tienen velocidades terminales de aproximadamente 6 a 9 m/s, mientras que las velocidades de flujo superficial son mucho menores (aproximadamente de 0.3 a 0.6 m/s), también las partículas que remueven, ejercen un determinado papel de sellado al rellenar parte de los poros de la capa superficial, disminuyendo la capacidad de infiltración de la superficie. Hay que decir que son las partículas entre 0.063 y 0.250 mm las más fácilmente desprendidas por el impacto de las gotas y que las más fácilmente desprendidas por el flujo están entre 0.1 y 0.3 mm por lo que el sedimento transportado por el flujo laminar es pobre en partículas mayores a 1 mm y rico en materiales más finos (De Regoyos-Sáinz, 2003). Esto nos habla de una erosión selectiva, con concentración de fracciones arenosas en las partes altas de las laderas y un incremento de materiales arcillosos en las zonas de deposición. La pérdida de esta fracción fina, también llamada complejo coloidal, implica claramente una pérdida de calidad del suelo, ya que en ella se concentran importantes propiedades químicas del suelo, como la capacidad de

intercambio catiónico que está fuertemente ligada a la fertilidad, el desarrollo microbiano y la retención de agua entre otras. La fuerza abrasiva y la de arrastre de la corriente laminar están en función de la profundidad y la velocidad de escurrimiento para una partícula o agregado de suelo de tamaño, forma y densidad determinados. Sin embargo, la erosión de tipo laminar es más una idealización que una realidad, puesto que los procesos de erosión raramente ocurren uniformemente sobre el terreno afectado. De hecho, el flujo erosivo, en su camino pendiente abajo, "es rara vez en forma de una lámina de agua de profundidad uniforme y más comúnmente es una masa de cursos de agua anastomosados o trenzados de canales poco pronunciados" (Morgan, 2005), de lo que se desprende que tanto el flujo laminar como dichos canales van agrupándose en función de la microtopografía, que controla la dirección de la escorrentía, y de las rupturas que provocan las rocas y la cubierta vegetal tendiendo rápidamente a concentrarse en canales, surcos o cárcavas. Todas estas consideraciones nos acercan a la idea de que la rugosidad superficial del terreno y los obstáculos que puedan aparecer, lo que suponen es un proceso de canalización, por lo que cuanto más camino recorra el flujo más difícil será que permanezca en estado laminar y por tanto sólo las partes altas, y quizás medias, de la ladera, sean el tramo reservado o donde es predominante este tipo de flujo.

1.2.2. Erosión hídrica lineal o concentrada

Como hemos visto el agua que discurre ladera abajo tiende a agruparse controlada tanto por los obstáculos que encuentra en su camino, como por la macro y microtopografía del área en cuestión y este hecho está ampliamente aceptado que ocurre a una distancia crítica. Los estudios de Moss *et al.*, 1982, comprobaron que además del flujo principal se desarrollan cauces de flujos secundarios con una componente lateral pendiente abajo, que al converger aumentan la descarga, intensificando el movimiento de las partículas y abriendo pequeños canales o regueros por abrasión, de tan sólo unos pocos centímetros de profundidad, cuyas trayectorias son inestables y pueden cambiar rápidamente debido a los casos de deposición local o a la erosión que producen.

Los estudios de las características hidráulicas del flujo muestran que el cambio entre flujo laminar superficial a flujo en lineal en canales pasa a través de 4 etapas: flujo superficial no concentrado; flujo superficial con vías de flujo concentradas; microcanales sin cabeceras de desarrollo; y microcanales con cabeceras. El cambio global en las condiciones de flujo a través de las cuatro etapas parece tener lugar suavemente tal y como el número de *Froude* se incrementa desde aproximadamente 0.8 a 1.2, en lugar de que un ocurra cuando un valor umbral es alcanzado. El número de *Froude* relaciona el efecto de las fuerzas de inercia y la fuerzas de gravedad que actúan sobre un fluido, es un índice que determina si las ondas de gravedad se formarán en el flujo o no. Cuando el número de *Froude* es menor que 1.0, las ondas de gravedad no se forman y el flujo, relativamente suave, se describe como tranquilo o subcrítico. Números de *Froude* mayores de 1.0 denotan un flujo rápido o supercrítico, que se caracteriza por ondas de gravedad, que son más erosivas (Morgan, 2005). De aquí se deduce que los microcanales se forman cuando el flujo es suficientemente erosivo como para realizar incisiones en el terreno. Con el tiempo y sucesivos eventos, este camino ya marcado sigue creciendo debido a la erosión que produce el flujo convirtiéndose de microcanales a canales (o regueros, surcos o canalillos, en inglés *rills*). Cuando esta incisión lineal se convierte en demasiado profunda o demasiado amplia para ser eliminada fácilmente por las operaciones normales de labranza, es que se produce el cambio de surco a cárcava (en terminología inglesa *gully*). Si la cárcava se retira poco después de su formación (lo que es común en campos de cultivo), entonces se le llama efímera. Para una definición más concreta de la formación de cárcavas, y como ya se citó anteriormente, cualquier canal con escorrentía efímera y máxima superficie de sección transversal igual o superior a 0.0929 m² puede ser considerada como una cárcava (Hauge, 1977;. Poesen *et al*, 2003; citados en Borselli, 2011). Estas definiciones no dan diferencias entre surcos y cárcavas aparte de la diferencia de tamaño. Para hacer una clasificación entre ambas podríamos decir que los surcos se forman generalmente en las laderas o pendientes, tienden a ser paralelos, poco profundos y fácilmente recuperables por operaciones típicas de labranza o actividades de construcción, de manera que cuando vuelven a aparecer, se presentan en nuevos lugares determinados por la microtopografía. Por el contrario las cárcavas siempre suelen producirse en los mismos lugares, incluso después de prácticas de remediación que los eliminan por completo, ya que estos canales están determinados por la macrotopografía del paisaje, produciéndose en los lugares donde se enfrentan las orientaciones de dos pendientes como vaguadas, gargantas y angosturas. Las cárcavas son cursos de agua, con perfil en pendiente, relativamente permanentes que experimentan flujos efímeros durante las

tormentas. En comparación con los canales de los ríos estables, que tienen un perfil largo, cóncavo y relativamente suave hacia arriba, las cárcavas se caracterizan por una cabecera de corte y varios pasos o puntos de mella (o muesca) a lo largo de su curso, la formación de estas cabeceras de corte se detalla en la Figura 6 a continuación.

Las cárcavas se han clasificado de diferentes maneras, siguiendo criterios genéticos o morfológicos. Según la genética pueden ser descritas como digitadas si se bifurcan repetidamente mientras se desarrollan hasta que no hay un canal dominante claramente visible; axial cuando hay un canal principal; o frontal, si la anchura de la cabecera, con movimiento de retraimiento, es evidentemente mayor que la longitud de la cárcava (Morgan, 2005). Otra clasificación con respecto a la morfología de la cabecera fue propuesta por Dietrich y Dunne (1993, citado en Borselli, 2011): (1) gradual a través de pequeños pasos (<0.1 m), (2) pasos de gran tamaño (0,1 a 1 m), (3) pequeñas cabeceras de corte (1-10 m), y (4) grandes cabeceras de corte (> 10 m).

Una cabecera de cárcava en retracción puede interceptar vías de flujo no erosionadas aún y causar así, que se formen otras cárcavas que le sean tributarias, siguiendo el proceso descrito en la Figura 6 y produciendo gran cantidad de sedimentos. Del mismo modo el transcurrir del flujo por la cárcava va minando las bases de las paredes laterales y produciendo el colapso, de manera que el canal aumenta su anchura e incrementa aún más la cantidad de sedimento. Estas grandes cantidades de sedimentos producidos en la cabecera, las paredes, y sobre la base tienden a llenar rápidamente la capacidad de transporte del flujo de la cárcava, reduciendo así la remoción de la base río abajo, por lo que se caracterizan a menudo por un segmento aguas arriba donde la erosión está activa y una parte aguas abajo donde la sedimentación prevalece. Por otro lado las cárcavas se forman fácilmente en suelos altamente dispersivos (con frecuencia suelos sódicos), aprovechando las cicatrices profundas que dejan los deslizamientos de terreno o cuando la erosión por minado en galerías y túneles produce un colapso después de alcanzar un tamaño crítico y se libera de forma violenta todo lo retenido, como por ejemplo en la rotura de represas.

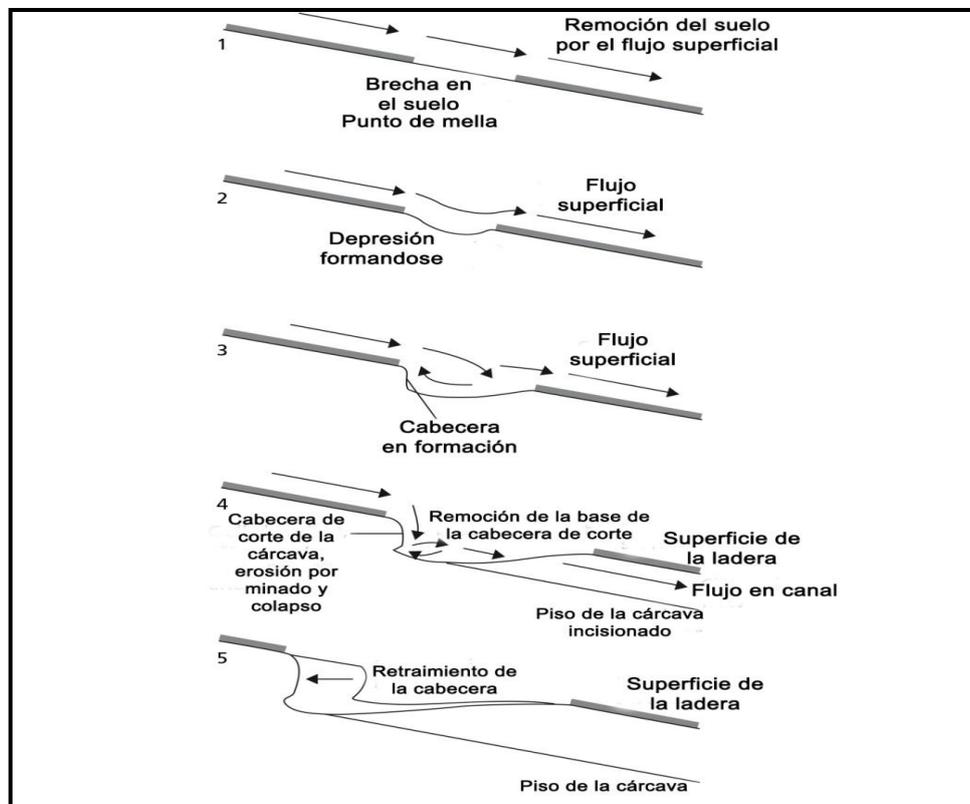


Figura 6. Fases de formación y desarrollo de las cabeceras de corte e inicio de una cárcava. 1. El flujo erosivo produce una brecha o punto de mella, es decir una incisión en el suelo; 2. Comienza a formarse una depresión en la incisión del suelo; 3. La dinámica del flujo comienza a formar una pared vertical o cabecera de corte; 4. Con la cabecera de corte ya formada y debido a la remoción que el flujo origina en su base, la erosión va minando la base de la cabecera y produciendo el colapso de la misma; 5. La cabecera crece retrayéndose en dirección aguas arriba según el proceso descrito en el punto 4. Fuente: modificado de Morgan (2005).

Las cárcavas están casi siempre asociadas a una erosión acelerada y por ello a la inestabilidad del paisaje y también en la medida que son receptoras de la mayoría de flujos que discurren por una pendiente se asocian a la desecación y encostramiento de las zonas no drenadas y por tanto a la desertificación y degradación del suelo sobre todo en los paisajes de ambientes áridos.

1.3. La Erodibilidad, un parámetro fundamental

La erodibilidad de un suelo es una característica intrínseca que define la susceptibilidad del mismo a ser erosionado por los agentes erosivos exógenos como la lluvia, la escorrentía, los movimientos de masas y el viento, es decir, a igualdad de otras condiciones externas existen suelos que son más fácilmente erosionados que otros. En este contexto, el concepto de erodibilidad se utiliza a menudo para dar una evaluación cualitativa de la eficacia de diversas formas de erosión causadas por agentes exógenos tales como agua, hielo y viento. El término "erodibilidad del suelo" fue por primera vez utilizado por Middleton en 1930 (Borselli, 2009). Sin embargo, es un concepto tomado de la literatura geomorfológica que fue desarrollado y adoptado en los comienzos del siglo XX. A finales del mismo siglo, el gran desarrollo de los estudios sobre la erosión del suelo y la experimentación en el campo de la conservación del mismo condujo a una extensión del concepto de erodibilidad en la ciencia del suelo.

Un desarrollo importante del concepto de erodibilidad del suelo se produjo a partir del estudio y la aplicación extensa del modelo de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (*USLE* por sus siglas en inglés) (Wischmeier y Smith, 1978; Lafflen y Moldenhauer, 2003; citados en Borselli, 2009) y de otras obras relevantes (Foster *et al.*, 1981, 2002; Renard *et al.*, 1997; Kinnell y Risse, 1998; citados en Borselli, 2009), que son implementaciones del mismo modelo básico conceptual, grupo al que nombramos "TIPO-*USLE*" (Borselli, 2009).

La erodibilidad como magnitud, conocida como Factor K en los textos y artículos especializados en el tema, puede expresarse tanto cualitativamente, a través de rangos como alto, medio, bajo, como cuantitativamente por números, es decir a través de un índice, número o parámetro definido como un coeficiente de proporcionalidad entre una fuerza, una presión o una energía, ligada a uno o más procesos específicos o agentes erosivos, por lo que el valor numérico que expresa está estrechamente relacionado con un determinado modelo para estimar la tasa de erosión del suelo, lo que le da un carácter relativo.

La erodibilidad del suelo representa de un modo agrupado la respuesta global de un suelo a un gran número de procesos hidrológicos y de erosión de los cuales la generación de escorrentía, erosión laminar y en surcos son los más importantes. Como el suelo es un medio muy complejo y dinámico, es fácilmente asumible que la erodibilidad dependerá de varios y multidisciplinarios factores, muchos de ellos correlacionados e inter-dependientes. Dentro de estos factores están:

1. Las condiciones del estado de agregación y la estabilidad de los agregados durante la primera humectación (resistencia al *slaking*), éste factor del tipo físico está a su vez relacionado con factores químicos como salinidad, sodicidad, capacidad de intercambio catiónico, etc., y con factores bióticos, presencia de materia orgánica, microrraíces, hongos, etc.
2. Dispersividad de la fracción de arcillas (dispersión química)
3. Resistencia al esfuerzo cortante superficial (resistencia al desprendimiento por la gotas de lluvia y la escorrentía superficial)
4. La capacidad de infiltración y la producción de escorrentía superficial
5. La tendencia a la formación de costras superficiales (sellado)
6. Las clases texturales del suelo y la distribución del tamaño medio de las partículas del suelo
7. El porcentaje de fragmentos rocosos de la fracción granulométrica del suelo
8. El tipo de clima preexistente en la zona, ya que estudios recientes sobre este factor mostraron que hay un efecto significativo del clima sobre la erodibilidad del suelo (Salvador-Sanchis *et al.*, 2008; Borselli *et al.*, 2012)

La respuesta del suelo ante todos estos factores es variable y diferente en el tiempo, ya que igual que el suelo es dinámico, su respuesta también lo es, por esta razón el intervalo de tiempo en el que se evalúa la erodibilidad adquiere un peso importante, cambiado el grado de complejidad de una evaluación anual a una de evento simple de lluvia.

La erodibilidad del suelo crece con el aumento de las características enumeradas en los puntos 2 y 5, y pueden disminuir con el aumento de las características enumeradas en los puntos 1, 3, 4 y 7. Al ser considerado un factor de resistencia a la erosión del suelo, lo conveniente es que disminuya lo más posible puesto que al ser integrado en cualquier modelo ejercerá mejor su condición de factor resistente. A modo de ejemplo, los valores de erodibilidad según un método de expresión cuantitativa y la referencia al tipo de clase en el que se encuentran, viene detallado en la Tabla 4 a continuación.

Tabla 4. Valores y clasificación de la erodibilidad. Fuente: elaboración propia

Valor	Clase	Valor	Clase
0 – 0.01	Bajo	0.03 – 0.04	Medio Alto
0.01 – 0.02	Medio Bajo	0.04 – 0.05	Alto
0.02 – 0.03	Medio	> 0.05	Muy Alto

Finalmente cabe citar que la evaluación cuantitativa de la erodibilidad está necesariamente vinculada a un modelado donde se utiliza este parámetro para evaluar, dentro de una escala predefinida espacio-tiempo, una tasa potencial de erosión del suelo a través de la erosión laminar o concentrada. Por ejemplo en los modelos del TIPO-USLE la erodibilidad del suelo se deriva a partir del estudio del efecto combinado de las precipitaciones y la escorrentía, siendo la tasa de pérdida de suelo por unidad de energía de erosión de la lluvia, medida en una parcela unitaria de 22.18 m de largo y una pendiente del 9%, que se mantiene continuamente en un estado de barbecho limpio, con la labranza realizada en dirección arriba y abajo de la pendiente.

Por otro lado en el presente estudio se realizará el cálculo de la erodibilidad, a través de un método innovador dentro del marco nacional, ya que el software KUERY1.4 de Borselli *et al.* (2012), nunca ha sido utilizado para estudios de suelos en México, siendo un algoritmo de cálculo que toma en consideración todas las variables típicas de otros modelos, implementándolas con consideraciones de carácter climático además de los porcentajes de materia orgánica y fragmentos rocosos, por lo que a través de un sencillo display de pantalla, se pueden alcanzar muy buenos resultados en los datos de erodibilidad de las zonas muestreadas, evitando las ecuaciones aproximativas de otros modelos.

El carácter de parámetro fundamental que se le otorga en este estudio a la erodibilidad reside en la definición y agrupamiento de todas las características que representan al elemento final estudiado, el suelo, las cuales son tanto del tipo físico como químico y biológico y además en la condición que posee de ser el principal elemento de resistencia a la erosión, para los tipos de suelos y las áreas de estudio del presente proyecto, ya que en ellas, debido a su condición de zona árida, la cobertura vegetal es escasa y las medidas de conservación y/o protección de suelo o no existen, o han caído en desuso y abandono. Por lo que a los suelos de las áreas de estudio, tan solo les queda su propia resistencia intrínseca a la erosión, para evitar desaparecer.

1.4. Estimaciones de la erosión hídrica

Las estimaciones del grado de erosión hídrica, es decir de la cantidad de pérdida de suelo producida por este hecho, pueden ser determinadas empíricamente para un área determinada, a través de rigurosos trabajos de campo, o de manera más general realizando una modelización de un área concreta que sea extrapolable a otras áreas de condiciones semejantes, o incluso más generales si esas consideraciones son incluidas en el modelo. En sí, dichas estimaciones permiten realizar un pronóstico del recurso, el suelo, durante un determinado lapso de tiempo y establecer así las bases para la proyección de acciones futuras en la planeación del uso y manejo del suelo (Loredo-Osti *et al.*, 2007). Por lo tanto, el fin último de estas estimaciones es el cálculo de las tasas de erosión potencial y/o actual (real), ya sea cualitativa o cuantitativamente, para poder establecer las áreas más afectadas y conocer la magnitud de la problemática y diseñar, en su caso, las medidas de conservación o control necesarias.

Las estimaciones de la erosión hídrica a través de procedimientos empíricos suelen llevar asociados costosos trabajos de campo por períodos de tiempo muy largos, lo que ha condicionado que proliferen los estudios en base a modelos semiempíricos, conceptuales, completamente físicos o basados en procesos dinámicos de transporte y acumulación de sedimentos.

Los modelos son necesariamente simplificaciones de la realidad. En este sentido deben conocerse las relaciones entre los factores que causan pérdida de suelo a través de la erosión hídrica y aquellos que ayudan a reducir dichas pérdidas. Las decisiones deben hacerse en un nivel adecuado de complejidad o simplicidad en función del objetivo (Morgan, 2005). El investigador es el que debe determinar cuáles son los parámetros necesarios para poder expresar el conocimiento en forma de resultados, en base a la complejidad objetivo y no sólo basándose en el *background* teórico existente, sino también a través del conocimiento local, empírico, de aquellos parámetros que puede observar, necesarios para plasmar esa realidad que se intenta "modelizar".

Así en el desarrollo del modelo de erosión digital con base empírica pretendido por este trabajo, se deben consensuar los factores directamente dependientes del proceso en sí, por lo que dichos factores deben llevar implícitas las consideraciones climáticas y temporales, las propiedades intrínsecas del suelo, físicas y químicas, los factores topográficos, las premisas de conservación de la masa y la energía, las consideraciones socio culturales del área y los factores ambientales y del ecosistema donde se lleva a cabo el proyecto.

1.5. Modelados de la erosión hídrica

A lo largo de la historia se han ido sucediendo diversas ecuaciones que han realizado una aproximación a la realidad de la erosión hídrica a nivel de campo, de manera que por norma las más tardías han ido incorporando y mejorando los conocimientos desarrollados por las más tempranas.

Evidentemente se hace más sencillo comprender los procesos de erosión durante períodos cortos de tiempo, por ejemplo durante un solo evento de precipitación, pero se puede aplicar este entendimiento a períodos más largos de tiempo, en la medida en que el valor de las predicciones crece con el tiempo en los propósitos de conservación y remediación, pero con el limitante de que la extrapolación continua no es factible hasta el infinito, por lo impredecible que resulta el factor tiempo-clima. Así para los modelos con base empírica, una buena alternativa es la suma de predicciones para tormentas individuales o desarrollar los cálculos a partir de bases de datos anuales por periodos de cuantos más años sea posible, para lograr un modelado a más largo plazo. De la misma forma la escala de operación también es muy significativa ya que los requisitos específicos para el modelado de la erosión hídrica sobre una gran cuenca de drenaje difieren de los exigidos por los modelos de pérdida de suelo de una parcela agrícola o un pequeño tramo de ladera, ya que la escala influye en el número e importancia de los factores que deben ser incorporados, alrededor de los cuales debe ser construido el modelo. En estos últimos casos de pequeñas áreas definidas, nunca se debe pretender un comportamiento aislado del modelo, ya que sería poco realista, pues la transferencia de materia y energía en los límites del área considerada es un hecho y debe ser incorporado dicho comportamiento dentro del modelo.

Así pues, se han desarrollado modelos de erosión basados en diferentes procesos y escalas. Algunos de ellos se han aplicado a nivel parcelas de campo, en zonas de pendiente pronunciada, a escala de cuenca y en entornos complejos que integran una región o incluso un país entero. El éxito de estos modelos depende de los objetivos propuestos, las características del sitio afectado, la disponibilidad de datos a nivel espacial y temporal, la escala de representación del proceso y los requerimientos de *hardware* para el desarrollo e implementación del modelo (Merritt *et al.*, 2003).

En los siguientes apartados se realiza una descripción detallada de los principales modelos usados para la elaboración de este estudio (y sus sucesivas modificaciones) y una revisión rápida de otros modelos existentes de amplia aceptación en el panorama científico especializado.

1.5.1. USLE (*Universal Soil Loss Equation*) Ecuación Universal de Pérdida de Suelo.

La USLE fue diseñada en 1954 en el Centro Nacional de Datos de Pérdida de Suelo y Escorrentía (*National Runoff and Soil Loss Data Center*) por la Administración de Educación y Ciencia de los Estados Unidos de Norte América en colaboración con la Universidad de Purdue. Nace como evolución, en un intento de generalizar para su uso en mayores ámbitos y condiciones, de otras ecuaciones de pérdida de suelo de carácter regional diseñadas en la década de los cuarenta, con el impulso del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA por sus siglas en inglés). De hecho fue el resultado de un enorme esfuerzo de recopilación y análisis de datos, que se extiende desde la década de 1930 hasta la década de 1970, que culminó en el Manual de Agricultura 282 (Wischmeier y Smith, 1965) y finalmente en el Manual de Agricultura 537 (Wischmeier y Smith, 1978).

Se considera el primer algoritmo de cálculo de la pérdida de suelo y desde entonces ha servido de base para otros modelos desarrollados posteriormente.

"La USLE es un modelo de erosión diseñado para calcular las pérdidas de suelo promedio a largo plazo de erosión laminar y en surcos en condiciones específicas. También es útil para las obras de construcción y otras condiciones no agrícolas, pero no predice la deposición y no calcula la producción de sedimentos de cárcavas, orillas de los arroyos y erosión del lecho del arroyo" (Wischmeier y Smith, 1978).

La USLE capacita para predecir la tasa media de pérdida de suelo para cada alternativa posible de las combinaciones entre sistema de cultivo y prácticas de manejo que se asocian a un tipo de cultivo, a un patrón pluviométrico y a una topografía específicos. (Wischmeier y Smith, 1978).

La forma de la ecuación es:

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

donde:

A es el cálculo de la pérdida de suelo por unidad de área, expresada en las unidades seleccionadas para K durante el período de tiempo seleccionado para R. Normalmente se usaban las unidades tonelada por acre por año.

R es el factor de lluvia y escorrentía, es decir el número de unidades del índice de erosión por la lluvia más un factor para la escorrentía del derretimiento de la nieve o otra agua aplicada en caso de que esa escorrentía sea significativa.

K es el factor de erodibilidad, es la tasa de erosión por unidad del índice de erosión para un suelo específico medido en una unidad de terreno, definida como 72.6 pies de largo en una pendiente uniforme del 9% en una sucesión de limpio-labrado-barbecho. Es un valor experimental, que para suelos específicos que difieren de la unidad estándar de terreno puede ser calculado a través de un nomograma calculado por medio de los porcentajes de las distintas clases texturales del suelo, la materia orgánica, un código de la estructura del suelo usado para su clasificación y la clase de perfil de permeabilidad.

L es el factor longitud de la pendiente, es decir la proporción de pérdida de suelo entre la ladera de estudio y la estándar de 72.6 pies bajo condiciones idénticas.

S es el factor de inclinación de la pendiente, es la proporción de pérdida de suelo del gradiente de la pendiente en estudio comparada con la estándar de la pendiente del 9% bajo condiciones idénticas con respecto a todo lo demás.

C es el factor de cultivo y manejo, es la proporción de pérdida de suelo de un área con un cultivo y manejo específicos comparada con el área estándar idéntica bajo condiciones de labrado continuado de barbecho.

P es el factor de práctica de ayuda al manejo, es decir la proporción de pérdida de suelo entre una práctica de ayuda como el contorneo, sembrado en fajas o en terrazas con respecto a la estándar de sembrado en líneas rectas hacia arriba y debajo de la pendiente.

El objetivo que se persigue con la aplicación de la USLE para evaluar el riesgo a la erosión, es que el personal profesional pueda estimar los tres niveles de erosión que caracterizan su área de trabajo, es decir la erosión potencial, la erosión actual y la erosión tolerable o de sostenibilidad (Wischmeier y Smith, 1978).

1.5.2.RUSLE. Ecuación Universal De Perdida De Suelos Revisada

Esta ecuación sustituye a la ecuación universal de pérdida de suelo (USLE) para predecir la pérdida de suelo, entre surcos (que sería del tipo laminar) y en surcos, causada por las lluvias y el flujo superficial asociado.

La RUSLE conservó la estructura de la ecuación de la USLE, pero cada una de sus relaciones de factores fue actualizada, con datos más recientes o nuevas relaciones derivadas y basadas en las teorías de erosión modernas, para hacer un uso óptimo de la base de datos que la USLE estaba usando. Los factores siguieron representando el efecto del clima, suelo, topografía y uso de la tierra entre surcos y en surcos, pero se añadió la posibilidad de descomponerlos en subfactores más ajustados para permitir una mayor flexibilidad en el cálculo de las pérdidas de suelo para situaciones que no estaban representadas aún, pero con datos de erosión importantes. Para las situaciones que simplemente no

estaban cubiertas por todos estos datos, la RUSLE también podía utilizar la ciencia básica basada en el proceso de erosión para complementar la base empírica, por ejemplo permitiendo la estimación de la deposición a través de relaciones básicas de transporte de sedimentos. Debido a que aumentó la complejidad de sus ecuaciones para cuantificar los factores, la RUSLE fue computerizada para facilitar sus cálculos (Renard y Ferreira, 1993)

La RUSLE puede ser usada apropiadamente para:

- Predecir pérdida de suelo promedio a largo plazo de condiciones de campo específicas, usando un sistema específico de manejo.
- Para predecir erosión entre surcos/cárcavas y en los surcos/cárcavas, en pastos, cultivos y sitios en construcción.
- La pérdida de suelo calculado por el modelo, es la cantidad de sedimento perdido por el perfil, no la cantidad de sedimento que deja la cuenca o el terreno.
- El perfil del paisaje es definido por una longitud de la pendiente, la cual es la longitud del origen del flujo superficial hasta el punto donde el flujo alcanza una mayor concentración o una mayor área de deposición como en las pendientes cóncavas y cerca de los límites del terreno.
- Para estimar las tasas de erosión que son removidas del suelo, de partes críticas del paisaje y que guían a la elección de las prácticas de control de la erosión hasta un nivel de pérdida de suelo tolerable.

RUSLE por otro lado, y como cita su propio manual, no puede ser utilizado para estimar o predecir la pérdida de suelo de las tormentas individuales ni de un año en particular de las condiciones meteorológicas. Los factores utilizados en RUSLE se basan en promedios de largo plazo.

La forma de la ecuación sigue siendo la misma pero se emplean nuevas relaciones para estimar los seis factores presentes:

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

donde:

A es el promedio de pérdida de suelo anual a largo plazo [por lo general expresada en toneladas / acre-año, aunque actualmente se usa tonelada / hectárea año ($T \cdot ha^{-1} \cdot y^{-1}$)].

R es erosividad de la lluvia. Es uno de los más exactos de entre los factores RUSLE, computado a través de la base de datos de cantidad e intensidad de lluvia. Este factor representa la fuerza motriz de la erosión laminar y en surcos. Las diferencias de R corresponden a las variaciones de las zonas climáticas

K es la erodibilidad del suelo. Es un indicador de la erodibilidad inherente al suelo bajo las condiciones estándar de la unidad de terreno, definida por la USLE, mantenida en continuo barbecho.

LS es el impacto adimensional de longitud de la pendiente y la inclinación

C representa el impacto adimensional de los sistemas de cultivo y de gestión

P es el impacto adimensional de las prácticas de control de erosión.

La conversión de la USLE a unidades del SI se describe en Foster *et al.* (1981)

Todos los parámetros adimensionales se normalizan con respecto a las condiciones de parcela unitaria, como se describe en el Manual de Agricultura 537 de Wischmeier y Smith (1978).

1.5.3. RUSLE2

La versión 2 de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada (RUSLE2) estima la pérdida de suelo, la producción de sedimentos, y las características de los sedimentos de la erosión en surcos e intersurcos (laminar y concentrada) causada por las lluvias y el flujo superficial asociado. La RUSLE2 es una segunda generación de RUSLE, pero más que ser una simple mejora, es un nuevo modelo con nuevas características y capacidades que puede ser usado en las unidades de EE.UU. o las del S.I., aunque el enfoque general es el mismo y muchos de los valores de la base de datos RUSLE2 son los mismos que de RUSLE. La ecuación utiliza factores que representan los efectos del clima (erosividad, precipitación y temperatura), la erodibilidad del suelo, la topografía, la gestión de la cubierta, y las prácticas de control para calcular la erosión.

Igual que sus predecesores utiliza un sistema de ecuaciones implementadas en un programa de ordenador, para estimar las tasas de erosión, y una base de datos que contiene una amplia gama de valores, que son utilizados por el usuario de RUSLE2 para describir una condición específica del sitio, y

así poder calcular los valores de erosión que reflejen directamente las condiciones de ese sitio en particular.

La RUSLE2 puede ser usada apropiadamente para:

- evaluar las tasas de erosión potencial en sitios específicos y guiar los planes de conservación y control de la erosión,
- hacer un inventario de las tasas de erosión en áreas geográficas grandes,
- estimar la producción de sedimentos en las zonas altas de las cuencas hidrográficas que podrían alcanzar las zonas de deposición (rendimientos de sedimento),
- zonas de tierras de cultivo, pastos, pastizales, bosques perturbados, obras de construcción, terreno minado, terrenos ganados al mar, vertederos, terrenos militares, y otras zonas en las que el suelo mineral está expuesto al impacto de las gotas de agua y al flujo superficial (es decir flujo hortoniano) producido por una intensidad de lluvia superior a la tasa de infiltración.

Introduce el concepto de trayectoria de flujo superficial (*overland flow path*) que se define como el camino por el que fluye la escorrentía desde su origen hasta donde entra en una concentración de flujo principal o mayor. Las concentraciones de flujo principal son ubicaciones en el paisaje donde los lados de una ladera se cruzan para recoger el flujo superficial en canales definidos. Es en estos canales definidos donde se forman las cárcavas ya sean efímeras o clásicas.

1.5.4.PSIAC

El modelo *Pacific Southwest Inter-Agency Committee* (PSIAC) fue elaborado en 1968 para propósitos de planeación, en sentido amplio, de cuencas mayores de 25.9 Km² (10 millas cuadradas), con la intención de proveer de guías para la evaluación y selección de medidas para la reducción de la erosión y los rendimientos de sedimento. Fue designado específicamente para las condiciones climáticas predominantes en esa área de los EE.UU., que incluía bastante variabilidad, desde zonas húmedas hasta completamente áridas. El modelo se basa en una experta evaluación a través de visitas a campo, complementadas con datos sobre el clima, el suelo, el uso del suelo, las tasas de erosión y las prácticas de conservación de suelos

En el área propuesta se recomendaba clasificar el rendimiento de sedimento en cinco rangos o clases de pérdida media de sedimento anual en acres o pies por milla cuadrada (Tabla 5).

Tabla 5. Rangos y clasificación de las clases de pérdida de suelo del modelo PSIAC. Fuente: modificado de la explicación del uso del diagrama de puntuación para la evaluación de los factores que afectan al rendimiento de sedimentos, del reporte PSIAC (PSIAC, 1968).

Clase	Media de rendimiento anual	Unidades	Rango
1	> 3.0	Acres o pies /milla cuadrada	Muy Alta
2	1.0 - 3.0	Acres o pies /milla cuadrada	Alta
3	0.5 - 1.0	Acres o pies /milla cuadrada	Moderadamente Alta
4	0.2 - 0.5	Acres o pies /milla cuadrada	Moderada
5	< 0.2	Acres o pies /milla cuadrada	Baja

Para determinar este rendimiento de sedimento se recomendaban nueve factores, que eran (A) la geología superficial, (B) los suelos, (C) el clima, (D) la escorrentía (*runoff*), (E) la topografía, (F) el tipo de cobertura del suelo (*ground cover*), (G) las prácticas o usos del suelo (*land use*), (H) la erosión superficial (*upland erosion*) e (I) la erosión en cárcava o en canal (*channel erosion*) junto con el transporte de sedimento (*sediment transport*). A cada uno de estos factores (A - I) se les asignaba un valor numérico (Tabla 6), dependiente de sus características, representando su nivel de significancia relativa en la clasificación del rendimiento, realizando finalmente la suma de todos los valores asignados para establecer la clasificación y los rangos designados por la Tabla 5.

Tabla 6. Valoración de los factores del PSIAC con respecto a las características de los factores que afectan a los suelos estudiados. Fuente: modificado de la explicación del uso del diagrama de puntuación para la evaluación de los factores que afectan al rendimiento de sedimentos, del reporte PSIAC (PSIAC, 1968).

Factor	Puntaje	Principales características
(A) Geología Superficial	0	(a) Formaciones duras, masivas
	5	(a) Rocas de dureza media, (b) moderadamente degradado, (c) moderadamente fracturado
	10	(a) Esquistos marinos y lutitas y limolitas relacionadas
(B) Suelos	0	(a) Alto porcentaje de fragmentos de roca, (b) agregados de arcillas, (c) con alto contenido de materia orgánica
	5	(a) Textura media, (b) fragmentos de roca ocasionales, (c) capas de caliche
	10	(a) Textura fina, fácilmente dispersables, salino-alcálinos, características de alta contracción-expansión, (b) granos de limos individuales y arenas finas
(C) Clima	0	(a) Clima húmedo con lluvias de baja intensidad, (b) Precipitación en forma de nieve, (c) clima árido con tormentas de baja intensidad, (d) clima árido con tormentas convectivas raras
	5	(a) Tormentas de duración e intensidad moderada, (b) tormentas convectivas poco frecuentes
	10	(a) Tormentas de varios días de duración con cortos períodos de lluvias intensas, (b) tormentas convectivas frecuentes e intensas, (c) Ocurrencia de congelado - descongelado
(D) Escorrentía	0	(a) picos bajos de flujo, (b) bajo volumen de escorrentía por unidad de superficie, (c) eventos de escorrentía raros (poco frecuentes)
	5	(a) picos de flujos máximos moderados, (b) volumen moderado de flujo por unidad de área
	10	(a) altos picos de flujo, (b) gran volumen de flujo por unidad de área
(E) Topografía	0	(a) Laderas de superficies suaves (b5%), (b) extensas llanuras aluviales
	10	(a) Laderas de superficies moderadas (b20%), (b) desarrollo moderado de llanuras de inundación
	20	(a) Laderas de superficies escarpadas (N30%), relieve pronunciado, poco o ningún desarrollo llanura de inundación
(F) Cobertura del suelo	-10	(a) Material completamente protegido por la vegetación, fragmentos de roca o arena. Pocas oportunidades por parte de las precipitaciones de llegar el material erosionable
	0	(a) Cubierta b40%; cama de paja notable, (b) si hay presencia de árboles, el sotobosque no está bien desarrollado
	10	(a) Cobertura del suelo b20%, escasa vegetación, poco o nada de cama de paja, (b) ninguna roca en la superficie del suelo
(G) Uso de la tierra	-10	(a) Ningún cultivo, (b) sin tala reciente, (c) baja intensidad de pastoreo
	0	(a) b25% cultivado, (b) 50% o menos recientemente talado, (c) b50% intensamente pastoreado, (d) Camino ordinario y otras construcciones
	10	(a) N50% cultivada, (b) Casi la totalidad de la zona intensamente pastoreada, (c) todo la zona recientemente quemada
(H) Erosión Superficial	0	(a) No hay signos aparentes de la erosión
	10	(a) Alrededor del 25% del área caracterizada por surcos y cárcavas o erosión por deslizamientos de tierra, (b) Erosión eólica con deposición en los canales de flujo
	25	(a) N50% del área caracterizada por surcos y cárcavas o erosión por deslizamientos de tierra
(I) Erosión en canal y transporte de sedimentos	0	(a) canales anchos poco profundos con pendientes planas, poca duración del flujo, (b) canales en rocas masivas, grandes rocas o con buena vegetación, (c) canales controlados artificialmente
	10	(a) profundidades de flujo moderadas, duración flujo media con erosión ocasional de las orillas o los lechos del canal
	25	(a) Erosión continua o a intervalos frecuentes de las orillas con grandes profundidades y larga duración del flujo, (b) cabeceras activas y degradación en los canales tributarios

El procedimiento proporcionaba las guías que describían las características de los factores con influencia sobre el rendimiento de sedimentos, y una tabla resumen que añadía la valoración de cada una de las características (Tabla 6), con las siguientes valoraciones; de 0 a 10 para la geología superficial, los suelos, el clima, la escorrentía, la cobertura del suelo, y la práctica de manejo; de 0 a 20 para la topografía; de 0 a 25 para la erosión superficial y en cárcavas más el transporte de sedimentos; así pues la suma de todos los factores sería de 0 a 130 puntos y de esta manera la tabla de rendimiento quedó así (Tabla 7).

Tabla 7. Valuación de las características de los factores y relación rangos-clasificación del modelo PSIAC. Significado de las siglas: (Ac.) acres, (Ft) pies, (mil.²) millas cuadradas. Fuente: reporte PSIAC, 1968.

Clase	Tasa Carácter. Factores	Media de rendimiento anual	Unidades	Clasificación
1	> 100	> 3.0	(Ac./Ft) /mil. ²	Muy Alta
2	75 - 100	1.0 - 3.0	(Ac./Ft) /mil. ²	Alta
3	50 - 75	0.5 - 1.0	(Ac./Ft) /mil. ²	Moderadamente Alta
4	25 - 50	0.2 - 0.5	(Ac./Ft) /mil. ²	Moderada
5	0 - 25	< 0.2	(Ac./Ft) /mil. ²	Baja

Del mismo modo describía una serie de medidas de corrección recomendadas para controlar estos procesos y la forma de evaluarlas y evaluar el efecto que producían dichas medidas según el mismo sistema de valoración del modelo, pero corregido con el efecto de las medidas.

1.5.5.MPSIAC

El modelo PSIAC fue modificado en 1982 (Johnson y Gembhart, 1982), de ahí que se denomine MPSIAC a tal modificación. Varios autores, Najm *et al.* (2013), Bagherzadeh y Mansouri (2012), Llanloo (2012), argumentan que este modelo es más cuantitativo que la versión anterior y la puntuación es más fiable, ya que se introducen nueve ecuaciones correspondientes a los nueve factores, mientras que en el método PSIAC, la producción de sedimentos se supone que es directamente proporcional a los valores numéricos totales asignados a los nueve factores. La puntuación debe hacerse después de los estudios de campo y la recopilación de todos los datos relacionados con los factores MPSIAC. Los nueve factores del modelo MPSIAC son los mismos que para su predecesor, incluyendo la geología de superficie, el suelo (factor K de RUSLE), el clima, la escorrentía, la topografía, la cobertura del suelo, uso del suelo, la erosión superficial y la erosión en cárcavas.

El modelo ha sido ampliamente aplicado a escala de cuencas hidrográficas en las regiones áridas y semiáridas de los EE.UU. y fue evaluado para su aplicabilidad a diferentes países con predominancia de estas condiciones, como Etiopía, Irán, Argelia, Tanzania, etc.

Para calcular el rendimiento de sedimento Johnson y Gembhart (1982) introdujeron la ecuación:

$$S_y = 18.60e^{0.036 \text{ Rating}} \quad (2)$$

donde:

S_y = es el rendimiento de sedimento ($m^3/km^2/y$)

e = es la base natural de los logaritmos

Rating = es la suma de los factores del PSIAC

$$\text{Rating} = Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_4 + Y_5 + Y_6 + Y_7 + Y_8 + Y_9 \quad (3)$$

donde:

Y_1 = es el factor de geología de la superficie

Y_2 = es el factor del suelo (factor K de RUSLE),

Y_3 = es el factor del clima,

Y_4 = es el factor de la escorrentía,

Y_5 = es el factor de la topografía,

Y_6 = es el factor de la cobertura del suelo

Y_7 = es el factor de uso del suelo

Y_8 = es el factor de la erosión superficial

Y_9 = es el factor de la erosión en cárcavas

Las diferentes ecuaciones de estos factores se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 8. Descripción de las ecuaciones necesarias para determinar los factores del modelo MPSIAC. Fuente: modificado de Johnson y Gembhart, 1982.

Factores eficaces	No	Ecuación	Descripción
geología de la superficie	1	$Y_1=X_1$	X_1 =Es un índice geológico dependiente del tipo de roca, dureza, fracturación e intemperismo de los reportes geológicos de los datos de campo (0-10, Rocas duras masivas valor 1, esquisto, lutita o limolita valor 10)
Suelo	2	$Y_2=16.67X_2$	X_2 = es la erodibilidad del suelo, factor K de la USLE determinada por los procedimientos de Wischmeier y Smith 1978
Clima	3	$Y_3=0.2X_3$	X_3 = cantidad en mm. de una lluvia de 6-horas con un periodo de retorno de 2 años determinado por los datos de precipitación
Escorrentía	4	$Y_4 =0.2X_4$	X_4 =es la suma del volumen anual de escorrentía en mm 0.03 veces y el caudal máximo anual en $m^3/sec./km^2$ 50 veces
Topografía	5	$Y_5=0.33X_5$	X_5 = es el grado de inclinación de la pendiente en porcentaje (%)
Cobertura del suelo	6	$Y_6=0.2X_6$	X_6 = porcentaje de suelo desnudo
Uso del suelo	7	$Y_7=20-0.2X_7$	X_7 =porcentaje de cobertura de los cultivos o vegetación
Erosión superficial	8	$Y_8=0.25X_8$	X_8 =es el factor de erosión superficial (SSF) determinado por los procedimientos descritos en el Bureau of Land Management, BLM, Manual 7317
Erosión en cárcavas	9	$Y_9=1.67X_9$	X_9 = es la valuación de las cárcavas del SSF asociadas a X_8
Rating=puntuación rendimiento sedimentos; $R= X_1+16.67K+0.2P_2+(0.006R+10QP)+0.33S+0.2\%S_d+20-0.2\%C_v+0.25SSF+1.67SSFg$ S_y = producción de sedimentos (ton / ha / año) $QS= S_y=18.60e^{0.036R}$			

1.5.6.Otros

1.5.6.1.Modelos empíricos y conceptuales

- **SEDD** (*SEdiment Delivery Distributed*, o Entrega de sedimento distribuida en español) modelo basado en el modelo empírico USLE, propuesto por Ferro and Porto (2000) citado en Aksoy y Kavvas (2005).
- **AGNPS** (*AGricultural NonPoint Source* o Fuente No Puntual Agrícola) modelo basado en evento simple que simula la escorrentía, el transporte de sedimentos y nutrientes de las cuencas agrícolas. El modelo divide la cuenca en celdas cuadradas distribuidas uniformemente a lo largo de la cuenca. El componente de la erosión y el transporte de sedimentos se basa en la estimación de la erosión superficial por la USLE y encauzándola a través de una ecuación de continuidad de estado estacionario de sedimento. El suelo erosionado se subdivide en cinco clases de tamaño: arcilla, limo, pequeños agregados, grandes agregados y arena.
- **LASCAM** Algoritmo de generación y transporte de sedimentos conceptual y continuo en intervalo diario de tiempo que se acopló a un modelo de balance de agua y sal preexistente. LASCAM, Viney y Sivapalan (1999) citado en Aksoy y Kavvas (2005), fue originalmente desarrollado para predecir el efecto del uso del suelo y el cambio climático en las tendencias diarias de rendimiento y calidad del agua en cuencas forestales en Australia Occidental. El algoritmo de transporte de sedimentos desarrollado no discriminaba entre las clases de tamaño de los sedimentos. Se encontró que la cantidad de escorrentía y sedimentos producidos por el modelo se ajustaba bien a intervalos mensuales y diarios de tiempo, Viney *et al.* (2000) citado en Aksoy y Kavvas (2005), más tarde se juntó a un modelo conceptual de movilización y transporte de nutrientes al LASCAM.

1.5.6.2.Modelos de base física

- **ANSWERS** (*Areal Nonpoint Source Watershed Response Simulation* o Simulación de Respuesta de Cuenca en el Área de Fuente No Puntual en español). Incluía un proceso hidrológico conceptual y un proceso de erosión de base física. El proceso de erosión asumía que el sedimento se podía desprender por tanto la precipitación como por la escorrentía, pero sólo podía ser transportado por la escorrentía. En ANSWERS el modelo divide la cuenca en elementos pequeños e independientes. Dentro de cada elemento los procesos de escorrentía y erosión son tratados como funciones independientes de los parámetros hidrológicos y de erosión de ese elemento. En el modelo, las condiciones de la superficie y la profundidad de flujo superficial en cada elemento se consideran uniformes. No se consideran los surcos o canalillos. El efecto de surcos se supone que es descrito por el coeficiente de rugosidad de la ecuación de Manning utilizado en el modelo.
- **LISEM** (*Llmburg Soil Erosion Model* o Modelo de Erosión de Llmburg) es uno de los primeros modelos que utilizó sistemas de información geográfica (SIG o GIS por sus siglas en inglés). Aunque es de base física, LISEM utiliza mayormente ecuaciones derivadas empíricamente. El modelo, en la parte de la erosión del suelo, considera caminos, huellas de las ruedas y canales. Utiliza algunos índices dos para la predicción de la erosión del suelo como el índice de humedad, que se define como el logaritmo natural del área de contribución dividido por el gradiente de la pendiente (A/S), y que se pueden utilizar para identificar las posibles vías de flujo y para indicar las áreas húmedas y secas, y por lo tanto, las posibles áreas de origen de saturación de flujo superficial, que es una de las principales causas de la erosión. También el índice de poder de flujo y el índice de capacidad de transporte de sedimentos que del mismo modo son relaciones entre A y S y juntos, los tres índices sirven para calcular el índice de riesgo de erosión del suelo. El SIG se usa para la obtención de los mapas de los índices de la cuenca.
- **CREAMS** (*Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems* o Química, Escorrentía y Erosión para los Sistemas de Manejo Agrícola) El componente de transporte de sedimentos del CREAMS analiza la zona entre surcos y los surcos por separado. El desprendimiento tanto en el área de surcos como entre surcos está determinada por la USLE modificada. El procedimiento permite a los parámetros cambiar

- a lo largo del perfil de flujo superficial y a lo largo de los cursos de agua para describir la variabilidad espacial.
- **WEPP** (*Water Erosion Prediction Project* o Proyecto de Predicción de la Erosión Hídrica) es un modelo para predecir la erosión del suelo y el transporte de sedimentos de los campos, granjas, bosques, pastizales, sitios de construcción y áreas urbanas. Es un modelo continuo diario. WEPP divide la escorrentía entre surcos e inter-surcos, por lo que se calcula la erosión en los surcos y en las zonas entre surcos por separado. La ecuación de continuidad de sedimentos en estado estable se utiliza para predecir los procesos de los surcos y entre surcos. La erosión en surcos se produce si la resistencia al corte superficial ejercida por el flujo excede la resistencia al corte superficial crítica mientras que la carga de sedimentos del flujo es menor que la capacidad de transporte del flujo. La erosión laminar (entre surcos) se considera que es proporcional al cuadrado de la intensidad de lluvia.
 - **EUROSEM** (*EUROpean Soil Erosion Model* o Modelo EUROpeo de Erosión de Suelo) es un modelo para predecir la erosión del suelo por el agua de parcelas y pequeñas cuencas. El modelo fue diseñado como un modelo basado en evento simple, ya que se pensaba que la erosión era principalmente controlado por sólo unos pocos eventos al año. EUROSEM es un modelo de erosión dinámica y es capaz de simular el transporte de sedimentos, erosión y deposición para surcos, entre surcos y procesos sobre la ladera. El modelo proporciona la escorrentía total, la pérdida total del suelo, el histograma por tormenta y el gráfico de sedimentos por tormenta. Se encontró que los parámetros hidrológicos eran los más importantes, el desprendimiento de partículas y la cohesión del suelo también eran importantes, pero los parámetros de la cobertura de la vegetación no tenían un efecto significativo.
 - **KINEROS** (*KINematic EROsion Simulation* o Simulación Cinemática de la Erosión) se compone de elementos de una red, tales como planos, canales o conductos, y estanques o almacenamientos de detención, conectados entre sí. KINEROS es una extensión de Kingen, un modelo desarrollado por Rovey *et al.* (1977) citado en Aksoy y Kavvas (2005), con la incorporación de componentes de erosión y transporte de sedimentos. El componente de sedimento del modelo se basa en la ecuación de continuidad monodimensional del estado no estacionario. La tasa de erosión/ deposición es la combinación de la erosión por impacto de las gotas de lluvia y las tasas de erosión / deposición hidráulicas. Tasa de erosión por impacto de las gotas está dada por una ecuación empírica en la que la velocidad es proporcional a la segunda potencia de la precipitación. Se estima que la tasa de erosión hidráulica (escorrentía) es proporcional al déficit de capacidad de transporte, que es la diferencia entre la concentración de sedimentos actual en el flujo y la concentración máxima en estado estacionario. La erosión hidráulica puede ser positiva o negativa dependiendo de la capacidad de transporte local.
 - **RUNOFF** El componente de transporte de sedimentos de RUNOFF, Borah (1989) citado en Aksoy y Kavvas (2005) calcula la erosión del suelo y las rutas de sedimentos para el extremo aguas abajo de la pendiente en la que se produce flujo. El modelo tiene dos parámetros: coeficiente de desprendimiento por flujo, el cual debe ser calibrado por los datos observados, y el coeficiente de desprendimiento por impacto de las gotas de lluvia que es fijo. Aunque el modelo simula la descarga de sedimentos razonablemente, hay, sin embargo, algunas discrepancias debido a los parámetros fijados en el tiempo.
 - **WESP** Usando la ecuación de continuidad unidimensional para el transporte de sedimentos Lopes y Lane (1988) citado en Aksoy y Kavvas (2005) desarrolló un modelo matemático orientado a eventos de base física para la sedimentación en cuencas pequeñas. El esfuerzo cortante crítico debe ser superado para la iniciación de la producción de los sedimentos en el lecho del canal. No habrá ningún sedimento, siempre y cuando la esfuerzo cortante de flujo sea menor que el esfuerzo cortante crítico. El modelo se aplicó a un simulador de lluvia y a un conjuntos de datos naturales. Los hidrogramas se reprodujeron bien, mientras que los gráficos de sedimento no. Sin embargo, la carga total de sedimento se reprodujo bastante bien.

- **CASC2D-SED** La rutina de la erosión superficial del modelo hidrológico de base física CASC2D se introdujo por Johnson *et al.* (2000) citado en Aksoy y Kavvas (2005). El modelo hidrológico utiliza ecuaciones de continuidad de dos dimensiones y de momento cinético para la escorrentía y adopta la aproximación a través de la onda de difusión. En la parte erosión superficial del modelo, la capacidad de transporte de flujo se determina por una versión modificada de la ecuación de regresión dado por Kilinc y Richardson (1973) citado en Aksoy y Kavvas (2005). Aunque los hidrogramas de escorrentía se calcularon razonablemente bien, las gráficas de sedimentos no se podían simular adecuadamente. La producción de sedimentos se encontró dentro de un rango de 50% a 200%.
- **SEM** Un modelo distribuido erosión y transporte de sedimentos (SEM) se incorporó en el sistema de modelado hidrológico SHE. SEM simula la variación espacial y temporal de la erosión del suelo en las cuencas. Las partículas del suelo desprendidas por el impacto de las gotas de lluvia, son transportadas por el flujo superficial. El flujo superficial tiene en sí mismo un potencial de desprendimiento, llamado arrastre de flujo, que se iguala a la capacidad de transporte de flujo. La erosión o deposición neta se calcula como la diferencia entre la carga de sedimentos que entran y salen cada cuadrícula en la cuenca. El modelo tiene dos parámetros a ser calibrados a partir de los datos disponibles que están relacionados con la erodibilidad del suelo y el arrastre de flujo.

2. Marco geológico del área de estudio

2.1. Ubicación y acceso al área.

Se seleccionaron tres áreas cercanas a la ciudad de San Luis Potosí con un avanzado estado de degradación de suelo debido a una fuerte erosión, donde claramente predominaba la erosión hídrica en cárcava. Así se pretendió conseguir una cierta heterogeneidad de sustratos y resultados para hacer el modelado lo más abierto posible. De igual modo, dentro de cada área, se seleccionaron dos subáreas de muestreo con los mismos criterios. Las tres áreas de estudio se hallan hacia el suroeste de la ciudad de San Luis en diferentes ubicaciones de la Sierra de San Miguelito, todas siguiendo la carretera de N-80 dirección Guadalajara. La sierra abarca un área que engloba ubicaciones al sur, suroeste y oeste de la Ciudad de San Luis Potosí (Figura 7).

En la primera por fecha de muestreo se visitó la zona más cercana a la ciudad; este área se halla sobre la población de Mesa de Conejos (MC); sus coordenadas en el punto central son 22°05'57.24" Latitud Norte (N) y 101°03'24.28" Longitud Oeste (W), tiene su punto más alto a 2225 msnm y un área total de 0.88 Km². Las coordenadas centrales de cada subárea son, para el subárea 1 (MC_01) 22°06'12.14" Latitud Norte (N) y 101°03'40.35" Longitud Oeste (W) con un área total de 54,920.5 m², y para el subárea 2 (MC_02) 22°05'47.84" Latitud Norte (N) y 101°03'10.24" Longitud Oeste (W) con un área total de 71,834 m².

La segunda área de estudio se encuentra en la zona de El Tepetate cercana a la población de San José de La Purísima (TP), en un predio conocido como Ejido El Jaral, con coordenadas en el punto central 22°05'22.26"N y 101°10'24.67"W, 2430 msnm y un área total de 3.51 Km²; igualmente las coordenadas centrales para las subáreas son, subárea 1 (TP_01) 22°05'36.48"N y 101°10'07.65"W con un área total de 485,396.6 m², y para la subárea 2 (TP_02) 22°05'25.83"N 101°10'33.54"W con un área total de 1,246,766.2 m² (1.25 Km²).

Por último, y ya que según los mapas edafológicos de INEGI describen un cambio en el tipo de suelo cerca de la segunda área de estudio, se optó por muestrear, también en la zona de El Tepetate, el área cercana a la población San Antonio (TSA), sus coordenadas 22°04'10.46"N y 101°09'02.73"W, con 2350 msnm en su punto más alto y un área total de 6.44 Km², siendo las coordenadas centrales de sus subáreas, subárea 1 (TSA_01) 22°04'54.65"N y 101°09'32.40"W, con un área total de 325,497.8 m² y subárea 2 (TSA_02) 22°04'36.45"N y 101°09'08.32"W, con un área total de 154,338.1 m². La localización espacial de todas las áreas puede observarse en la siguiente imagen (Figura 7).

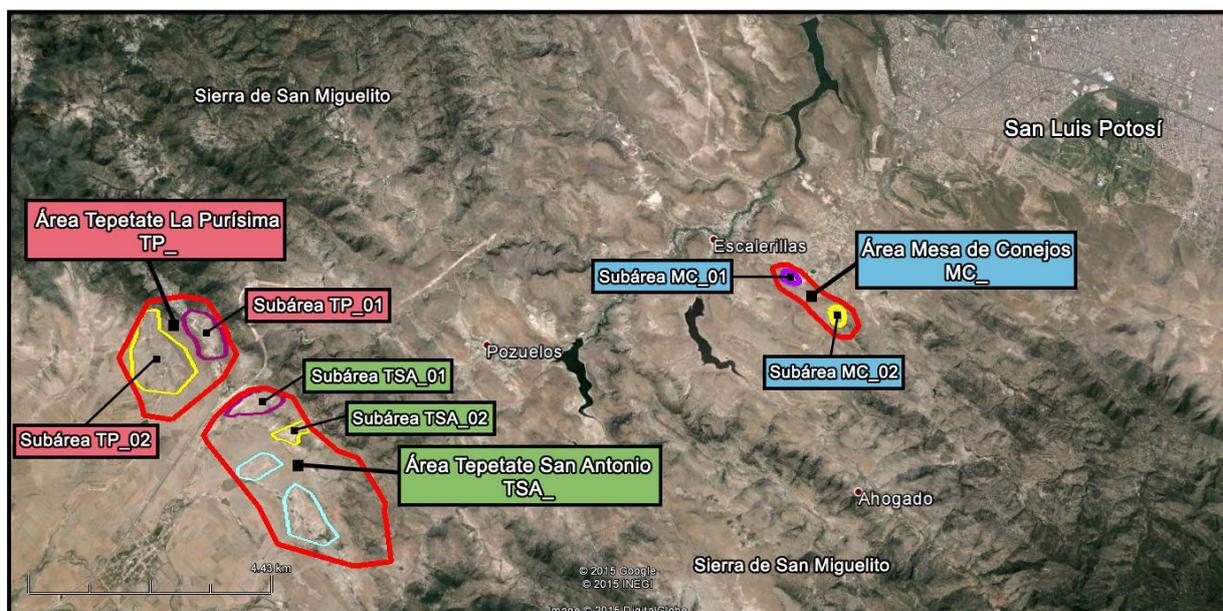


Figura 7. Ubicación espacial de las áreas de estudio. En la imagen se ubican claramente las Áreas y Subáreas de estudio, como nota se aprecia en azul claro en el área de Tepetate San Antonio, unas subáreas propuestas que no llegaron a muestrearse, por completa imposibilidad para cumplir con los tiempos, por lo que se reservan para próximos estudios. Google Earth 2015, Imagen del área de la Sierra de San Miguelito fecha 24/02/2015, obtenida 30/05/2015

2.2. Fisiografía del área de Estudio

El área de estudio se encuentra dentro del estado de San Luis Potosí en el área que corresponde a la provincia fisiográfica conocida como La Mesa Central, la cual se localiza en la parte centro-norte de México (Figura 8).

Ésta, es una zona semidesértica del país, caracterizada por ser una región elevada que internamente puede subdividirse en dos sub-regiones. La región norte, que es de mayor extensión, muestra un estado de erosión más avanzado que la región sur, tiene grandes cuencas continentales rellenas de sedimentos aluviales y lacustres, y presenta cotas por debajo de los 2000 msnm. La región sur tiene cotas que se encuentran por encima de los 2000 msnm, con excepción del valle de Aguascalientes, y es una zona montañosa cubierta en su mayor parte por rocas volcánicas cenozoicas, que muestra un estado de erosión mucho más activo que la región norte, con desniveles más pronunciados y los rasgos estructurales, principalmente fallas normales, se observan menos erosionados (Nieto-Samaniego *et al.*, 2005).

El límite entre las dos regiones de la MC lo constituye un gran lineamiento de más de 1 600 km de longitud con rumbo NW, que ha sido documentado como un sistema de fallas normales de edad cenozoica en San Luis Potosí-San Luis de la Paz.

La Mesa Central es pues, una planicie elevada donde más de la mitad de su superficie se encuentra por encima de la cota 2000 m y las elevaciones topográficas en su interior son moderadas, la mayoría forman desniveles inferiores a los 600 m. Se encuentra limitada al norte y al este por la provincia fisiográfica Sierra Madre Oriental, hacia el oeste por la provincia fisiográfica Sierra Madre Occidental y al sur por la depresión conocida como El Bajío, perteneciente a la provincia fisiográfica Eje Neovolcánico (Figura 8).

Se puede decir que las provincias fisiográficas circundantes tienen, en general, relieves más pronunciados. Si se traza un perfil aproximadamente este-oeste que atraviese la región meridional de la Mesa Central y se extienda fuera de los límites de ésta, se podrá observar que las cotas promedio de la Sierra Madre Occidental y la Sierra Madre Oriental están por debajo de la cota promedio de la Mesa Central, también es notable que los desniveles dentro de la Mesa Central son menores a los observados dentro de las sierras, lo que le confiere su carácter de una meseta elevada y relativamente más alta que las regiones circundantes (Nieto-Samaniego *et al.*, 2005).

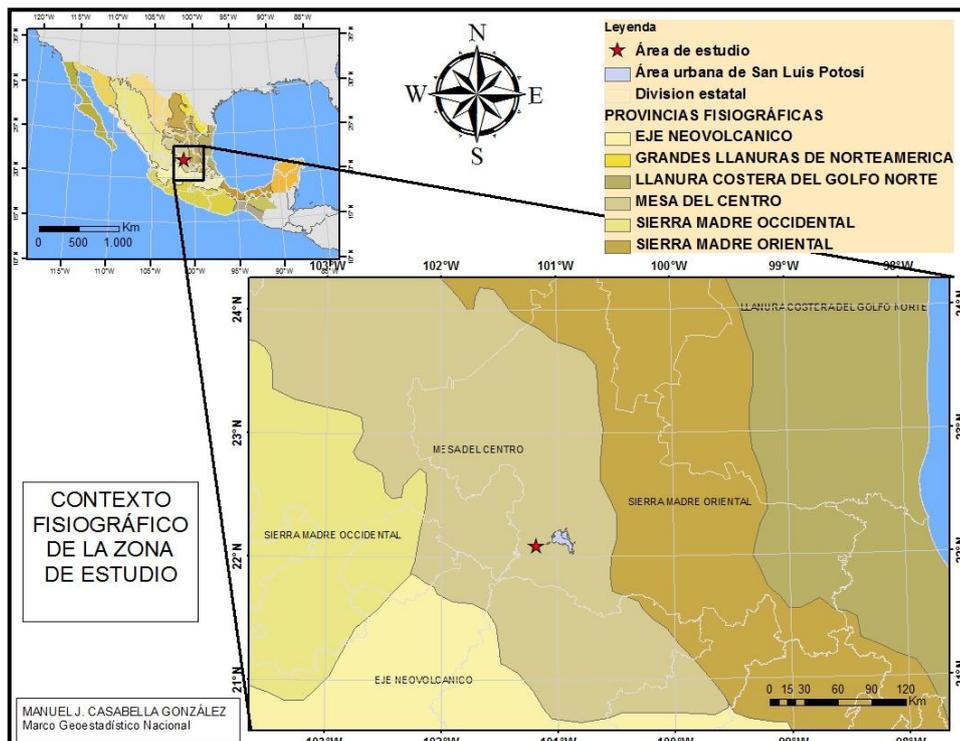


Figura 8. Provincias Fisiográficas de México y ubicación del área de estudio. Fuente: Elaboración propia a partir de los Metadatos del Marco Geoestadístico Nacional 2010b

2.3. Geomorfología del área de Estudio

Las topofomas presentes en el área de estudio son:

2.3.1. Área de estudio 1 Mesa de los Conejos (MC). Es un cerro truncado con una planicie en su tope, de ahí su nomenclatura como "mesa", con orientación noroeste - sureste (NW-SE) situada entre unos 2120 - 2130 msnm. que progresivamente va aumentando su cota, en la zona del sureste hasta convertirse en un cerro un poco más abrupto, pero que mantiene un contorno suavizado, que alcanza los 2225 msnm. Las dos subáreas de estudio muestreadas se sitúan sobre la ladera que buza en términos generales hacia el noreste (NE) con algún cambio hacia N-NE en la zona del cerro, teniendo un promedio del 16.5% de pendiente en la zona más al norte, diremos la mesa y un poco más alto de algo más del 18% de pendiente en promedio para la zona más al sur, diremos el cerro. Toda el área forma parte de la cuenca hidrográfica de San Luis Potosí pudiendo considerarse como uno de sus límites o parte aguas.

~ La subárea Mesa de los Conejos_01 (MC_01; Figura 9) es parte de la base final de la ladera NE de la "mesa", es decir en su zona más al norte, la ladera es de poca longitud y abrupta, por lo que supone un cambio drástico de ángulo al pasar a la base y ésta se podría considerar una zona de deposición; la longitud de su eje máximo es de 330 m y de su eje menor, que está orientado en dirección a la pendiente es de 170 m. La diferencia media de desnivel entre el inicio de la base y su final, considerada el área de interés, es de unos 15 m y se determinó un valor de la pendiente cercano al 14% con una longitud promedio de 107 m. Debido al uso agrícola de temporada que se le dio en anteriores años, se halla bastante nivelado con ligeras ondulaciones debido al abandono, aún así la pendiente es suficiente para que la escorrentía ocurra sobre su superficie provocando los fenómenos erosivos que hicieron que fuera seleccionada como área de estudio.

~ La subárea de Mesa de los Conejos_02 (MC_02) es una zona situada en la propia ladera a media pendiente de la zona más al sur, lo que nombramos como el "cerro" y es de carácter natural, sin ningún tipo de actuación antrópica; su eje máximo, que coincide con la dirección de la pendiente, es de 320 m y su eje menor 250 m en su zona más ancha. Es en esta zona que el buzamiento cambia un poco hacia el norte, encontramos en el área de mayor interés, donde se hallan las cárcavas, un desnivel medio de unos 28 m de diferencia, con una longitud promedio de 170 m. y un valor de la pendiente de algo del más de 17%.



Figura 9. Visualización del subárea de estudio Mesa de Conejos_01. A la izquierda de la imagen se aprecia la pendiente que buza hacia el NE de la Mesa de los Conejos y en su base, rodeada por una barda es su zona inferior, el subárea de estudio MC_01

2.3.2. Área de estudio 2 Tepetate La Purísima (TP). Se encuentra entre 2 estribaciones al sur de la zona NW, conocida como la zona del domo de Cerro Grande (Labarthe-Hernández y Jiménez-López, 1992), de la Sierra de San Miguelito, una de las estribaciones, que podría ser

considerada en esa zona un lomerío que viene descendiendo desde la sierra, separa las dos subáreas de estudio, dejando a la primera de ellas entre las dos estribaciones mencionadas y a la otra en la ladera que se abre al valle de Villa de Arriaga.

- ~ La subárea Tepetate La Purísima_01 (TP_01; Figura 10) se conforma como una pequeña microcuenca que vierte sobre la cuenca mayor de Villa de Arriaga. Está orientada en dirección NW-SE como la mayoría de estructuras de la Sierra de San Miguelito, de manera que la descarga de sedimento se produce por la vertiente SE. La zona de máximo interés se halla ubicada sobre la ladera NE del valle, cuyo buzamiento es contrario es decir hacia el SW, corresponde a una media ladera con descenso abrupto de la inclinación como se pudo observar en la Figura 10, aún así sus contornos son suavizados, su eje mayor tiene una longitud total de 1.025 Km y el eje menor es de unos 0.5 Km, el promedio de la pendiente de toda la ladera, desde el parte aguas hasta la base de la misma es del 11.8%, pero para la parte superior se calculó una pendiente promedio del 14.4% con un promedio de longitud y desnivel de 189.5 y 27.3 m respectivamente, y para el área donde aparecen las cárcavas, considerada el área de interés, la pendiente en promedio fue del 11.1%, con un desnivel y longitud promedios de 19.1 y 171.7 m respectivamente. Presenta una erosión extrema en forma de cárcavas y zonas grandes donde el suelo se perdió completamente, la ladera termina en una depresión central en la parte del más baja del valle, por la que discurre un arroyo de agua permanente cuyo curso ha erosionado en profundidad, creando paredes verticales que alcanzan en ocasiones los 3 - 4 m. La ladera SW de la microcuenca presenta una mayor vegetación natural de cobertura y un perfil más uniforme sin cambios de inclinación, también posee alguna zona de erosión difusa con pérdida casi total o total del suelo, pero pocas cárcavas.
- ~ La subárea Tepetate La Purísima 2 (TP_02) es la ladera contraria que comparte parteaguas con la ladera surponiente de la subárea TP_01, tiene una orientación NW-SE similar a la subárea TP_01, su eje mayor es de 1.7 Km y el menor es de 1.22 Km con una pendiente promedio del 9.8%, es de formas suavizadas y está vagamente aterrizada, lo que indica un uso anterior como cultivo de temporada, con muro seco y otras estructuras de protección y conservación de suelos, también parecen existir canales de conducción que discurren a varias represas que se encuentran a lo largo del perfil longitudinal del área con la intención de hacer cosecha y almacenaje de agua, lo que refuerza la idea de su uso agrícola.

El área de interés sobre esta ladera, que buza en general hacia el surponiente, tiene forma burdamente como de hoz con el mango aguas-arriba y la hoja aguas-abajo, la parte que correspondería al mango tendría la topografía de un mini valle y una inclinación mayor que el resto con unos promedios de desnivel 20.7 m, longitud 182 m y una pendiente del 11.3%, la zona que correspondería a la hoja de la hoz tendría una pendiente más suavizada, se podría dividir en dos zonas siguiendo la curva, pero ambas con un promedio del 7.7% de pendiente, solo que la primera de ellas, la que estaría más pegada al mango, tiene una longitud y desnivel promedio mayor, de 566.5 y 44.1 m respectivamente, y para la segunda, la que se halla aguas-abajo, tiene unos promedios de 407 y 31.2 m para longitud y desnivel respectivamente.



Figura 10. Vista panorámica del área de estudio TP_01

2.3.3. Área de estudio 3 Tepetate San Antonio (TSA). Podría considerarse la continuación hacia el suroriente de la estribación que definíamos para el área TP_01, pero en la parte central entre los dos domos principales de la Sierra de San Miguelito, por lo que las topoformas son más redondeadas y suaves. Igualmente se trata de una ladera de poca pendiente, pero algo más larga, en la que el lineamiento del parteaguas de la loma está orientado en dirección NW-SE, por lo que la ladera buza hacia el surponiente abriéndose hacia el valle de Villa de Arriaga. Según vamos hacia el surponiente se produce un aumento abrupto y considerable de la pendiente debido a que empieza a levantarse la zona del domo. Por esto se calcularon dos promedios de pendiente en la zona en general, un tramo inicial más suave con promedios cercanos al 7% de pendiente, unos 50 m de desnivel y cerca de 720 m de longitud de ladera, y un segundo tramo, donde inicia a elevarse el domo, donde la pendiente promedio gana hasta el 18.4%, dato que proviene de los promedios de desnivel de 125.7 m y longitud de ladera de 674.7 m. Las dos subáreas de estudio muestreadas se encuentran sobre dicha ladera, diríamos en el tramo inicial por lo que no se esperan muchas variaciones en sus promedios locales respectivos.

- ~ La subárea de estudio TSA_01 (Figura 11) tiene un ligero cambio de orientación hacia el oeste, por lo que se puede decir que su orientación es W-SW; en este tramo la ladera tiene un tamaño considerable pudiendo llegar al kilómetro de longitud, por lo que la pendiente se hace suave a la vista, lo que es bastante cierto ya que en promedios es del 6.2% acumulando un desnivel promedio de 50.6 m en unos 816 m de longitud de pendiente.
- ~ La subárea TSA_02 se ajusta perfectamente a la definición dada para el tramo inicial descrito para el área de estudio 3 TSA en general, pero con el caso de que, al ser una zona acotada dentro de la ladera general, los promedios son algo más altos que los descritos anteriormente, de manera que encontramos una pendiente cercana al 10%, con un desnivel de 52.5 m y una longitud de ladera de 521.7 m.



Figura 11. Vista panorámica del área de estudio TSA_01

2.4. Antecedentes del área, vegetación y usos del suelo

2.4.1. Área de estudio 1 Mesa de los Conejos (MC). En su parte superior posee una vegetación natural nativa de muy baja densidad, formada por matorrales y arbustos en su mayoría con algunas herbáceas esporádicas y líquenes u otros saprófitos, muy dispersos y flanqueados en muchas ocasiones por afloramientos rocosos, de lo que se deduce un mal aprovechamiento incluso para pastoreo; por tanto, a través de las imágenes históricas estudiadas por medios SIG y de las observaciones directas realizadas en los estudios de campo, se le asigna "sin uso aparente de suelo" o "suelo natural".

Para la subárea MC_01 (Figura 9) situada al pie de ladera, se constató la presencia de un típico muro de contención y cierre de parcela agrícola, por lo que se presupone un histórico uso agrícola del área ya que, en la actualidad se encuentra abandonado o en desuso. Presenta algo de cobertura, por herbáceas esporádicas y líquenes formadores de costra, pero

de baja a muy baja densidad. No se pudo constatar un uso activo del terreno en las diferentes visita a campo, que englobaron una temporalidad casi anual, tan sólo una vez la presencia de ganado, una yegua y un potro pastando. Finalmente se le asignó "suelo de uso agrícola abandonado".

Para la subárea MC_02 valdrían las mismas consideraciones generales del área, suelo natural y algo de cobertura por herbáceas esporádicas pero sin matorral ni arbustos y de muy baja densidad, también con líquenes formadores de costra.

2.4.2. Área de estudio 2 Tepetate La Purísima (TP). Esta área pertenece a un predio ejidal conocido como Ejido El Jaral, siendo una zona de histórico uso agrícola y ganadero utilizada como agricultura de temporada, pastoreo con agostaderos y trashumancia según las conversaciones mantenidas con personas conocedoras del área. En general presenta una vegetación de alta a media densidad en las cimas de las estribaciones de la sierra que va disminuyendo con la altura, compuesta de pequeños árboles de encinos, pinos, arbustos, matorrales y herbáceas esporádicas. Sobre las laderas van apareciendo cactáceas, como nopales y garambullos, al tiempo que van desapareciendo las coberturas mayores y aumentando las herbáceas. En los pies de ladera y fondo de los valles comienzan los ambientes agrícolas o de captación y manejo hidrológico, existiendo varias zonas de concentración de agua en represas. En esta zona baja vuelven a aparecer las coberturas arbustivas y de matorral, llegando a existir algunos árboles aislados de porte pequeño (< 4m). De este modo, en toda el área se dan diferentes usos de suelo con zonas de suelo natural, uso agrícola, suelo agrícola abandonado, recuperación o conservación de suelos, usos hidrológicos del suelo y afloramientos rocosos.

En la subárea TP_01 (Figura 10) sobre la ladera nororiente se halla nula o casi nula cobertura de vegetación, del tipo matorral-arbusto predominantemente, con algunos ejemplares de árboles de porte pequeño y siempre en las zonas de mayor cota, aumentando la densidad según se va hacia el norponiente, ya que aumenta la altitud. Es en mitad-final de ladera que se halla la principal zona de muestreo de la subárea, conformada por un área de histórico uso agrícola pero abandonado, prueba de ello es la presencia de dos represas de acumulación de aguas de escorrentía en la parte alta norte también en abandono y rotas; de este modo el paso del tiempo permitió un desarrollo de una erosión muy avanzada poblando la subárea de enormes cárcavas de grandes cabeceras de retracción muy abiertas al no poder seguir avanzando en la dirección de la pendiente. Las imágenes históricas muestran que en algún punto entre los años 2000 y 2010 se realizaron determinadas obras de conservación consistentes en muros de piedra seca según las líneas de contorno topográficas en las zonas superior y medio superior de la ladera, que debido a su altura y posición parecen intentar disminuir la velocidad del flujo más que retener el material. Sobre las islas entre cárcavas se suele apreciar algo de vegetación herbácea espontánea, pero en general la cobertura es casi nula.

En el subárea TP_02 también tienen una cobertura de vegetación muy pobre, es una zona designada, al parecer, a la cosecha de aguas para su posterior uso agrícola, con dos represas activas. En toda la zona se hallan muros de piedra seca que otorgan una sensación de abanalamiento donde se desarrollan algunas herbáceas esporádicas y en los finales de estos bancales, conducciones antrópicas hacia las represas. La erosión ha hecho mella en muchas de las terrazas, creando nuevas vías de escurrimiento hacia la represa principal, que se encuentra en el fondo del valle. En la parte surponiente de la subárea, por debajo de la represa principal comienzan a aparecer los usos agrícolas del suelo con su respectiva separación en hojas de cultivo, y la mayoría de ellos con orientación contraria a la pendiente.

2.4.3. Área de estudio 3 Tepetate San Antonio (TSA). Es un área muy extensa de la que no se han podido recabar muchos datos históricos. Las imágenes disponibles desde el año 2000, no muestran muchos cambios en el uso el suelo excepto por la recuperación de usos agrícolas al suelo natural en la zona norponiente en algún punto entre el año 2000 y el 2009 que luego ya permanecieron hasta la actualidad. También al tiempo se realizaron determinadas medidas de conservación sobre esa área, con estructuras de muro de piedra seca que al parecer pretendía una recuperación del recurso suelo. Esta zona norponiente esta en principio con

una cobertura vegetal muy escasa, excepto por algunos núcleos de arbustos y matorral de densidad media a baja, aunque quizá en algún punto aislado llegue a ser densidad alta. En la parte suroriente se repiten estas mismas condiciones excepto en la zona más al oriente donde comienzan los lomerios y aumenta la cobertura arbustiva y de matorral llegando a tener varios núcleos de alta densidad, que al ir descendiendo pasa a media y baja ya en el plano. En la parte poniente de esta zona suroriental se desarrollan ciertos usos agrícolas y el discurrir de un curso de agua permanente hasta una presa, salpica el recorrido de manchones de arbustos y algunos árboles de densidades medias a altas. No está claro si existen usos ganaderos en el área pero es de suponer que podría darse. La calificación en general se reparte entre uso de suelo natural desnudo y con cobertura, agrícola y agrícola abandonado.

En el subárea TSA_01 encontramos una zona completamente devastada por la erosión con enormes y largas cárcavas que recorren toda la ladera que de una forma burdamente ordenada van paralelas entre sí. Las imágenes históricas nos hablan de que este hecho ocurre desde antes del año 2000, pero entre el 2009 y el 2010 aparecen medidas de conservación entre las cárcavas, compuestas de muros de piedra seca, claramente en un intento de retener y recuperar el sedimento transportado por ellas. La cobertura en este subárea es casi inexistente con pequeños arbustos aislados y plantas herbáceas esporádicas de muy baja densidad (Figura 11).

En el subárea TSA_02 ocurre exactamente lo mismo que en la anterior, con la única diferencia de que la ladera es más corta y que en sí es una zona mucho más pequeña, las cárcavas discurren entre un pasaje angosto entre dos zonas con cobertura vegetal de densidad media.

2.5. Geología del área de Estudio

2.5.1. Geología general del área de estudio

El marco geológico regional se delimita entre la Cuenca Mesozóica de Centro de México (CMCM) y la Provincia Volcánica de la Sierra Madre Occidental (SMOc). La primera la CMCM abarca gran parte de la porción central, oriental y suroriental en la Mesa Central (Carrillo-Bravo, 1982) contiene unos 700,000 km³ de sedimentos marinos con edad del Triásico al Cretácico ya que desde el Oxfordiano hasta finales del Cretácico prevalecieron condiciones marinas (Tristán-González, 2008), la segunda (SMOc) se generó en el Cretácico Tardío–Cenozoico temprano, asociada a la subducción de la Placa Farallón bajo la Placa de Norteamérica y a la apertura del Golfo de California (McDowell y Clabaugh, 1979).

En su registro geológico se emplazan las rocas más antiguas en la porción centro-oriental de la Mesa Central, que son de la Formación Zacatecas correspondiendo al Triásico Tardío y por otro lado los sedimentos del abanico Triásico tardío constituido por secuencias marinas turbidíticas provenientes del oriente, facies que delimitan burdamente la zona del margen continental en ese tiempo (Barboza-Gudino *et al.*, 1998).

Durante el Jurásico aparecen las secuencias volcánicas de la Formación Nazas, pre-oxfordiana, de andesitas, riolitas y dacita, en forma de flujos piroclásticos y lavas. En el Jurásico tardío comienza la sedimentación marina, con la Formación La Joya formada por depósitos fluviales y aluviales y desarrollo calcáreo secundario, que representan los depósitos basales de la transgresión marina del Calloviano-Oxfordiano, y continuó en el Jurásico Tardío con secuencias calcáreas y terrígenas de las formaciones Zuloaga y La Caja (Tristán-González, 2009).

En el Cretácico temprano prosigue la sedimentación marina debido a la continuación de la subsidencia por lo que los sedimentos son del tipo calcáreo, por un lado arcillosos de la Formación Taraise y por otro pelágicos con pedernal de las formaciones Cupido, La Peña y Cuesta del Cura. Sobreyaciendo a éstas, están los depósitos terrígenos de la Formación Indidura (Turoniano) y finalizó en el Maastrichtiano con la aparición del “*flysch*” de la Formación Caracol. Al tiempo se desarrollaba la secuencia marina de la Plataforma Valles–San Luis Potosí que comienza su formación en el Cretácico temprano, localizada al oriente de la Cuenca Mesozoica del Centro de México, sobre depósitos de anhidritas de la Formación Guaxcamá, finalizando su desarrollo con la acumulación de sedimentos terrígenos de la Formación Cárdenas en el Maastrichtiano (Carrillo-Bravo, 1971; López-Doncel, 2003).

En el Cenozoico sobre la secuencia marina y continental de la porción suroriental de la Mesa Central se emplazó una gruesa secuencia de rocas volcánicas (44-26 Ma), que se agruparon en dos campos

volcánicos, el de San Luis (CVSLP, Labarthe-Hernández *et al.*, 1982) que sería un poco más joven y el de Río Santa María (CVRSM, Labarthe-Hernández *et al.*, 1989). El CVSLP es un área que cubre aproximadamente 40 000 km².

Durante el Eoceno aparecen unos delgados derrames de lava andesítica de forma aislada, pero es en el Oligoceno cuando se inicia la etapa del vulcanismo voluminoso de ignimbritas riolíticas (31.9 Ma) seguidas de un enjambre de domos de composición riodacítica (31 Ma, Latita Portezuelo) en el CVRSM y acompañadas después de una serie de domos riolíticos (Riolita San Miguelito) y derrames piroclásticos asociados (Ignimbrita Cantera) en el CVSLP. Dentro del CVSLP se emplaza el Complejo Volcánico de la Sierra de San Miguelito (CVSSM) formado por lavas e ignimbritas, localizado al sur y occidente de la Ciudad de San Luis Potosí, donde las unidades volcánicas abarcan desde el Oligoceno temprano al tardío (Tristán-González *et al.*, 2009). Como ya se dijo anteriormente las áreas de estudio se encuentran en diferentes localizaciones de la Sierra de San Miguelito por lo que este área geológica (CVSSM) que les concierne, cobra especial importancia. La serie de domos del CVSSM se emplazaron siguiendo estructuras regionales con orientación NW-SE (Labarthe-Hernández *et al.*, 1982). La mayor parte del volumen de las rocas volcánicas de la secuencia superior lo forman los domos exógenos de las riolitas San Miguelito y El Zapote entre la que se encuentran intercalados paquetes gruesos de depósitos de flujos piroclásticos pertenecientes a las ignimbritas Cantera y San José con una edad de 29 Ma (Labarthe-Hernández *et al.*, 1982; Torres-Hernández, 2009).

Entre los 27 y 28 Ma, hubo actividad volcánica puntual de composición félsica siguiendo las fallas principales con orientación NW-SE. Los productos de este vulcanismo fueron ignimbritas de composición riolítica (Ignimbrita Panalillo) con intercalaciones de basalto (Basalto La Placa) lo cual sugiere un vulcanismo bimodal (Torres-Aguilera y Rodríguez-Ríos, 2005).

Entre los 22 y 20 Ma se traslaparon eventos restringidos de vulcanismo intraplaca en el CVSLP, que fue de composición basáltica. El último evento fue de forma intermitente, con generación de lavas basaníticas del Plio-Cuaternario (Tristán-González *et al.*, 2009).

2.5.2. Geología local del área de estudio

La geología presente en el área de estudio se determinó a través de la carta Geológico Minera Tepetate F14-A83 San Luis Potosí, edita por el Servicio Geológico Mexicano (2007).

Como se puede apreciar en la Figura 12, son tan sólo cinco unidades geológicas que alternadamente están presentes en las tres áreas de interés.

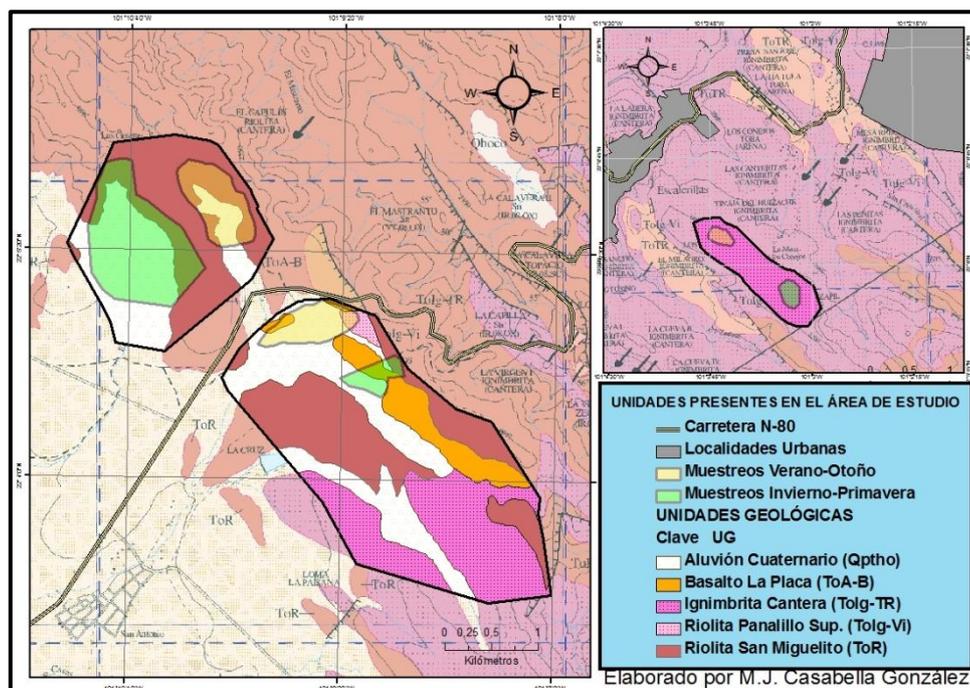


Figura 12. Unidades geológicas presentes en el área de estudio. Fuente: Elaboración propia

En el área de Mesa de Conejos tan sólo encontramos la unidad de tipo volcánico conocida como Ignimbrita Cantera, propuesta formalmente por Labarthe-Hernández *et al.* (1982), considerando su localidad tipo el arroyo de la Cantera a 2.5 Km al noroeste del poblado Los Arroyos, S.L.P., de edad 29.0±1.5 Ma.

En el área de estudio Tepetate La Purísima se observan dos unidades, en primer lugar La Riolita San Miguelito, descrita formalmente como tal por Labarthe-Hernandez *et al.* (1982), y la unidad del Cuaternario Holoceno, de tipo aluvial constituida por gravas arenas limos y arcillas.

En el área de Tepetate San Antonio encontramos además de las unidades volcánicas ya nombradas en las anteriores áreas de estudio (Ignimbrita Cantera, Riolita San Miguelito, Aluvión) otra Ignimbrita en este caso vitrificada, conocida como Riolita Panalillo superior, también de la misma edad y un basalto andesítico conocido como Basalto La Placa además de la unidad de aluvión del cuaternario descrita.

Descripción de las unidades: (Labarthe-Hernandez y Jiménez-López, 1992)

- **Riolita San Miguelito (TOR)**

Edad: Terciario Oligoceno, determinada por K/Ar, resultó 29.1 ± 0.7 Ma., (Tristán-González *et al.*, 2009).

Definición: originalmente fue descrita por Labarthe-Hernández y Tristán-González (1978), en la cartografía geológica de la Hoja San Luis Potosí; posteriormente fue propuesta formalmente por Labarthe-Hernández *et al.* (1982), considerando su localidad tipo en la estribación norte de la Sierra de San Miguelito, bordeando el valle de la Ciudad de San Luis Potosí (Lat. $22^{\circ}05.7'$ N, Long. $100^{\circ}59.8'$ W). Labarthe-Hernández y Jiménez-López (1992; 1993; 1994), la clasificaron como derrames episódicos. En campo se describe como una roca de color rosa a pardo con fenocristales subhedrales a anhedrales de cuarzo 10%, sanidino euhedral 15%, con biotita como mineral accesorio, en una matriz desvitrificada. Labarthe-Hernández *et al.* (1982) dividen a esta unidad en cuatro unidades, que de la base a la cima son como sigue: tefra basal (Tsemb); brecha de desintegración (Tsmo); riolita desvitrificada central (Tsm) y caparazón (Tsmc).

Distribución: se halla como unidad principal en el área de estudio 2 Tepetate la Purísima y ocupa gran parte del área de estudio 3 Tepetate San Antonio. En su marco general abarca gran parte de la Sierra San Miguelito aflorando en las porciones central poniente, suroriente y sur de la sierra.

Litología y espesor: descansando sobre la Latita Portezuelo, aparece la tefra basal (Tsemb) que consiste en una toba pobremente estratificada con cierta gradación, líticos de areniscas y de Latita Portezuelo, pómez sin colapsar, de 10 a 20 m de espesor. Sobre la tefra basal aparece en forma lenticular, una zona de brecha (Tsmo) que consiste de fragmentos angulares de 30 a 60 cm de vitrófido negro y gris oscuro verdoso, en matriz de fragmentos finos y ceniza de color crema amarillento, que se interpretan como correspondientes a la desintegración del caparazón, con un espesor que varía entre 15 y 40 m. Sobreyaciéndolas aparece un vitrófido masivo, de color negro a gris oscuro, lenticular, que va de 3 hasta 20 m de espesor. Arriba de las brechas de desintegración y/o del vitrófido masivo, está lo que es la porción central de los flujos de lava riolíticos (Tsm), que consisten en una roca de color gris claro a gris rosáceo, de textura holocristalina, porfirítica, con matriz afanítica, con 15-20% de fenocristales de 2 a 4 mm de sanidino euhedral y cuarzo subhedral a anhedral en la misma proporción o predominando el primero, con magnetita diseminada en la matriz, parcialmente alterada a hematita. La matriz está totalmente desvitrificada se observa textura fluidal, pliegues de flujo y en general, presenta una estructura columnar hacia su parte alta y planar en la porción media e inferior. Transicionalmente sobre la riolita desvitrificada de la porción central de los flujos de lava, aparece un caparazón que es un flujo de cenizas sin soldar (Tsmc) de color anaranjado o rosa, con abundante pómez sin colapsar y un 3 a 5% de fenocristales de cuarzo y sanidino. El espesor es del orden de los 90 m (Labarthe-Hernandez y Jiménez-López, 1992).

Relaciones estratigráficas: la Riolita San Miguelito sobreyace a la Latita Portezuelo con los contactos descritos. Hacia la zona de la Iglesia del Desierto, la primera no llega a cubrir a la segunda, estando la Ignimbrita Cantera directamente sobre el caparazón de la Latita Portezuelo. Esto indica que en esta porción, se está en el final de uno de los lóbulos de la Riolita San Miguelito; por otra parte subyace a la Ignimbrita Cantera.

- **Ignimbrita Cantera (TOIg-TR)**

Edad: Terciario Oligoceno, Labarthe-Hernández *et al.* (1982), obtuvieron una edad de 29.0 ± 1.5 Ma, por el método de K/Ar de roca completa, de una muestra de esta unidad, tomada al oriente del área estudiada.

Definición: originalmente fue descrita informalmente por Labarthe-Hernández y Tristán-González (1978), en la cartografía de la Hoja San Luis Potosí; posteriormente fue propuesta formalmente por Labarthe-Hernández *et al.* (1982), considerando su localidad tipo en el Arroyo de la Cantera, localizado a 2.5 km al NE del poblado de Arroyos, SLP.

Distribución: esta unidad cubre completamente el área de estudio 1 Mesa de los Conejos y se halla en gran parte del área de estudio 3 en la porción suroriente de la misma, donde empieza a elevarse la topografía correspondiente a los inicios del domo del cerro El Potosí. El cerro El Potosí está dentro de la Sierra de San Miguelito (SSM). Dentro del marco general ocupa la porción central y norte de la SSM, ocupando una depresión topográfica entre los domos del Cerro Grande al nororiente y del cerro del Potosí al surponiente.

Litología y espesor: Se trata de flujos de ceniza, que Labarthe-Hernández, *et al.* (1982) la dividieron de acuerdo a su grado de soldamiento en sin soldar (Tic) y bien soldada (Tics). Esto ayuda mucho para saber dónde se está estratigráficamente, sobre todo por el intenso fallamiento que se presenta en el área.

Base sin soldar (Tic)

La base de la Ignimbrita Cantera, consiste de la porción sin soldar de un flujo de cenizas riolítico. Su espesor es de 2 hasta 30 m. De un color blanco a rosa, con fenocristales de sanidino euhedral 15%, cuarzo anhedral 10%, pómez sin colapsar 10%, líticos 5%, empacados en una matriz de ceniza. No presenta fracturamiento notable.

Ignimbrita Cantera Soldada (Tics)

Transicionalmente, la base sin soldar pasa a una zona parcialmente soldada y luego al paquete de flujo de cenizas bien soldadas, que consiste de una roca de color gris rosáceo a café grisáceo, de textura porfirítica, en campo se observa una mineralogía de cristales de 2 a 4 mm de sanidino euhedral 15%, cristales subhedrales de cuarzo 7% en una matriz desvitrificada; presenta fiames de pómez colapsada, líticos verdosos, rojizos de areniscas y café de rocas volcánicas. Presenta un fracturamiento columnar muy notable. Su cima consiste de un horizonte parcialmente soldado de color rosa o ligeramente anaranjado, que es de donde se extrae la mayoría de la cantera ornamental en el área, y sobre él, en forma lenticular, una capa delgada sin soldar, de color crema, que tiene un espesor de 0.5 a 1 m.

El espesor de toda la Ignimbrita Cantera, incluyendo su base sin soldar, es del orden de 350 m. En el Valle de San Luis el pozo para agua IMMSA, localizado al W de la ciudad Capital, cortó 343 m, que con un echado supuesto de 15° NE, da un espesor de 331 m (Labarthe-Hernández y Jiménez-López, 1992).

Relaciones estratigráficas: sobreyace con los contactos descritos a la Latita Portezuelo y a la Riolita San Miguelito y subyace al miembro inferior de la Riolita Panalillo y en ocasiones discordantemente al conglomerado Halcones

- **Basalto La Placa (TOA-B)**

Edad: Terciario Oligoceno. Tristán-González *et al.* (2009), reportaron una edad por el método de K/Ar de roca entera de 21.5±0.5 Ma.

Definición: Originalmente fue descrito informalmente por Tristán-González y Labarthe-Hernández (1979), en la cartografía de la Hoja Tepetate, simplemente como un basalto. En la Hoja San Francisco lo reportan como Basalto, intercalado entre los dos miembros de la Riolita Panalillo. Por otro lado, Labarthe-Hernández *et al.* (1982), lo incluyeron como parte del Basalto Cabras. Aquí informalmente se está llamando como basalto La Placa, a una roca de esta composición que se encuentra subyaciendo al Miembro Superior de la Riolita Panalillo.

Distribución: aflora solamente en la porción norte del área 3 Tepetate San Antonio, en una faja delgada de orientación NW-SE.

Litología y espesor: se trata de una roca de color negro, frecuentemente vesicular, afanítica, de textura holocristalina, inequigranular, microporfirítica y pilotaxítica bien desarrollada en la matriz. Los microfenocristales son de andesina calcárea y olivino alterado a bowlingita. La matriz es de microlitos de plagioclasa, magnetita oxidada y posible piroxeno intersticial. Su espesor es de 10 a 15 m (Labarthe-Hernandez y Jiménez-López, 1992).

Relaciones estratigráficas: sobreyace a la Riolita San Miguelito y subyace al Miembro Superior de la Riolita Panalillo.

- **Riolita Panalillo (TOIg-Vi)**

Edad: Terciario Oligoceno, Tristán-González *et al.* (2009) determinaron una edad de 28.5±0.5 Ma por el método K/Ar de roca entera.

Definición: original e informalmente descrita por Labarthe-Hernández y Tristán-González (1978), en la cartografía de la Hoja San Luis Potosí; posteriormente propuesta formalmente por Labarthe-Hernández *et al.* (1982), considerando su localidad tipo al poniente del poblado del Panalillo, S.L.P.

Distribución: Se presenta tan sólo en la porción más al norte del área de estudio 3 Tepetate San

Antonio, en el marco general de la SSM, aflora en manchones aislados, generalmente distribuida irregularmente en forma alargada hacia la parte central de la SSM.

Litología y espesor: se trata de un paquete de rocas volcánicas que se dividieron en dos miembros:

- ~ Miembro inferior (Tap). Consiste de una serie de flujos de ceniza sin soldar, de color crema a amarillento, con 5 a 10% de fenocristales de sanidino y cuarzo, pómez sin colapsar y líticos de areniscas, rojizas y verdes, y de rocas volcánicas, en una matriz de esquirlas de vidrio y fragmentos del tamaño de ceniza. Con intercalaciones de tobas de caída, bien estratificadas, en capas de 2 a 10 cm, gradadas, muy finas y laminares, casi sin fenocristales y aisladamente con estratificación cruzada. Con cierta frecuencia presenta pequeños diques de tuficita de 10 a 40 cm. Estas tuficitas se llegan también a observar muy esporádicamente en la Ignimbrita Cantera infrayacente. Desde el poblado de Pozuelos y siguiendo el arroyo del Juachín, hasta 3.5 km al NW, la base de este miembro inferior, consiste en lo que se ha interpretado como una brecha co-ignimbrítica de rezago ("co-ignimbrite lag breccia", Tapb), que consiste de un depósito rico en líticos, pobremente clasificado, estratificado, con fragmentos de la Riolita San Miguelito, que van desde 5 cm a megabloques de 3 ó 4 m. Los fragmentos son tanto angulares como subredondeados y se encuentran en una matriz de cenizas. La proporción de estas es muy variable, ya que mientras en algunos lugares los fragmentos están empacados unos con otros casi sin cenizas, en otros predomina dicha ceniza, y a veces se intercalan delgadas capas de flujos de ceniza. Se trata de un depósito de caída libre, en o muy cerca de la zona de fuente, consistente por asociación de piroclásticos demasiado grandes y pesados que la columna no pudo soportar. El espesor del Miembro inferior de la Riolita Panalillo en la margen N de la Presa del Peaje es de 243 m. y en el Valle de San Luis en el pozo del poblado de La Rivera se cortaron 234 m. La brecha co-ignimbrítica tiene hasta 30 m de espesor (Labarthe-Hernández y Jiménez-López, 1992).
- ~ Miembro superior (Trp). Consiste de un flujo de cenizas riolítico, bien soldado, de poco espesor (10-30 m), que puede tener dos presentaciones: La primera es una roca de café claro a rosa claro, de textura microcristalina, porfirítica y eutaxítica, con 5 a 10% de fenocristales de 1-2 mm de cuarzo y sanidino, en una matriz parcialmente desvitrificada, con esquirlas de vidrio. Tiene pómez bien colapsada y líticos. La segunda es de color gris rosáceo, café o gris rojizo, de textura merocristalina, porfirítica, fluidal, con un 10 a 15% de fenocristales de 1 a 4 mm, de cuarzo y sanidino en una matriz parcialmente desvitrificada. Tiene pómez bien colapsada y su característica principal es que presenta numerosas esferolitas de 0.5 a 2.0 cm rellenas de calcedonia. Presenta estructura columnar muy típica y forma mesetas planas. Su contacto con el miembro inferior es un vitrófido negro de 1-2 m de espesor o bien una zona sin soldar muy delgada (20-50 cm).

Relaciones estratigráficas: sobreyace a la Ignimbrita Cantera y al Basalto La Placa, y sólo subyace discordantemente al Conglomerado Halcones.

- **Suelo Residual, Tepetate o Hardpan (Qsr)**

Consiste en un suelo de color crema polilitológico, con clastos que van de 1 hasta 80 mm subredondeados a redondeados, embebidos en una matriz cementada compacta masiva, mal seleccionada y endurecida. No se conoce su espesor, pero en algunos puntos se observa que posee tan solo unos 10 cm, aunque es probable que en otros puntos pueda llegar al metro de espesor. Se encuentra subyaciendo al Aluvión del Cuaternario. Aunque no se ha determinado su edad, debido a sus relaciones estratigráficas, tentativamente se coloca en el Cuaternario Temprano.

- **Aluvión (Qptho)**

Está constituido por gravas, arenas, limos y arcillas, que forman los valles de San Luis al norte y nororiental, y el de Villa de Arriaga al sur y surponiente del área. También aparecen estos depósitos aluviales en las vegas de los arroyos principales.

A continuación se muestra (Figura 13) la columna estratigráfica de las áreas de estudio presentes en este proyecto, ubicadas en la Sierra de San Miguelito. Se presenta la columna entera aún cuando hay unidades que no han sido descritas por no aflorar en las áreas de estudio del proyecto, sin embargo se consideró el incluirlas, ya que se nombran en las relaciones estratigráficas de las unidades si descritas.

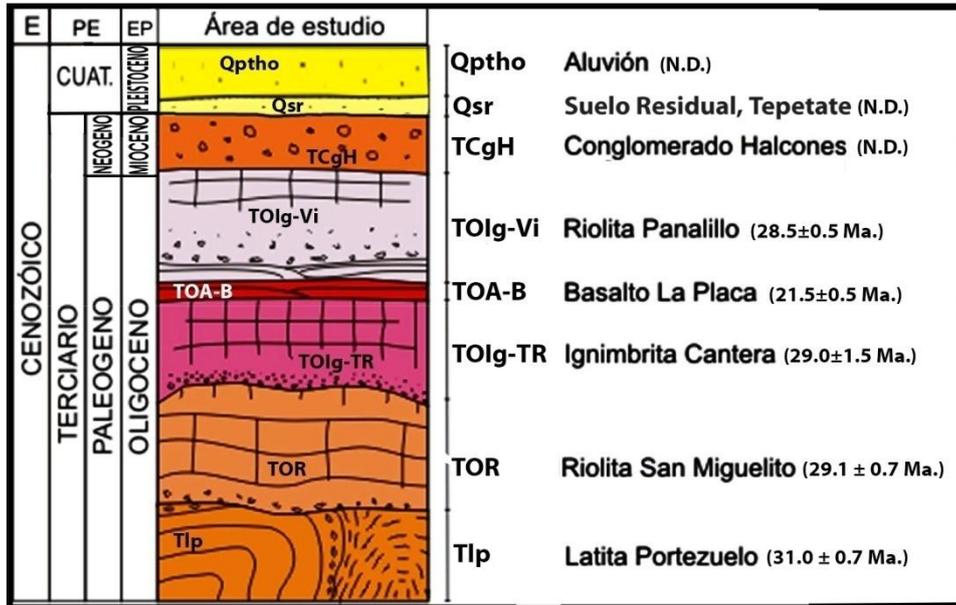


Figura 13. Columna estratigráfica de las áreas de estudio ubicadas en la Sierra de San Miguelito. Fuente: Modificado de Puente-Castillo, 2014.

2.6. Edafología presente en el área de Estudio

La división edafológica, presente en las áreas de estudio se limita a dos unidades tal y como se puede observar en la Figura 14, según una clasificación y referencia nacional y los datos obtenidos de INEGI - Recursos Naturales - Edafología San Luis Potosí - 2007 clave: F14-4 escala: 1:250 000:

- Regosol Calcárico, de textura media
- Xerosol Háplico, de textura media

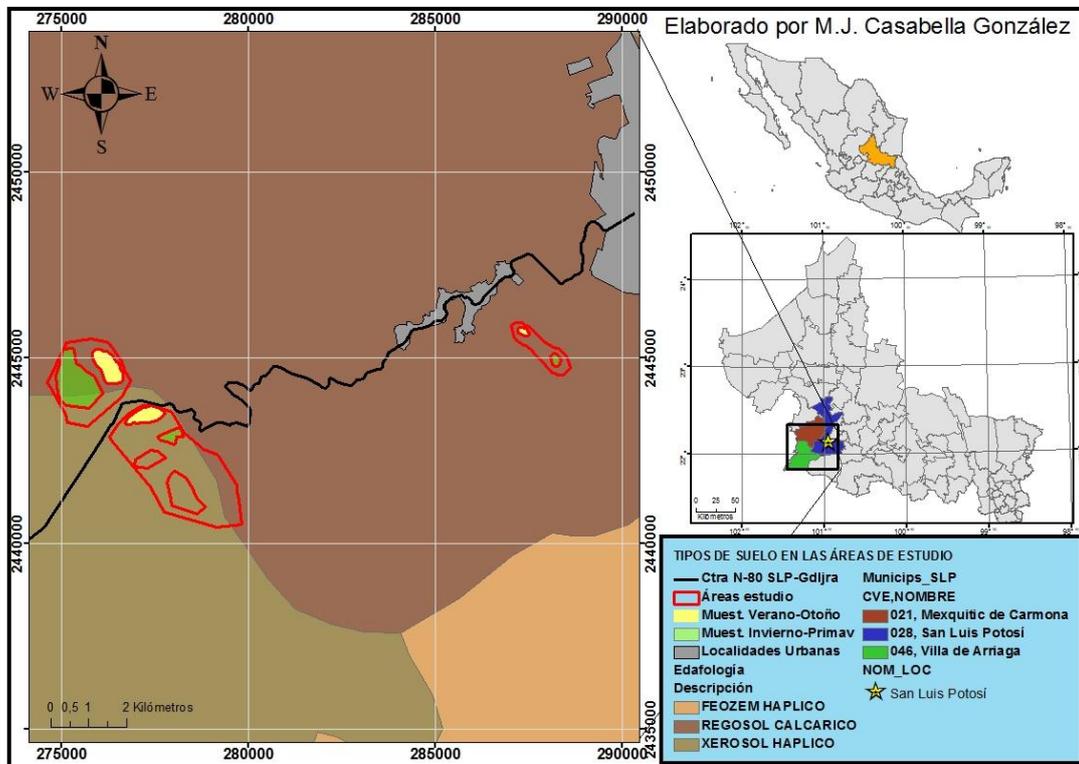


Figura 14. División Edafológica de las áreas de estudio. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos vectoriales de INEGI

XEROSOL

Del griego xeros: seco. Literalmente, suelo seco.

- Se localizan en las zonas áridas y semiáridas del centro y norte de México. Son el tercer tipo de suelo más importante por su extensión en el país (9.5%).
- Su vegetación natural es de matorral y pastizal.
- Tienen por lo general una capa superficial de color claro por el bajo contenido de materia orgánica. Debajo de esta capa puede haber un subsuelo rico en arcillas, o bien, muy semejante a la capa superficial.
- Muchas veces presentan a cierta profundidad manchas, aglomeraciones de cal, cristales de yeso o caliche con algún grado de dureza.
- Su rendimiento agrícola está en función a la disponibilidad de agua para riego.
- El uso pecuario es frecuente
- Son de baja susceptibilidad a la erosión, salvo en laderas o si están directamente sobre caliche o tepetate a escasa profundidad.
- Su símbolo es (X).

REGOSOL

- Los Regosoles forman un grupo remanente taxonómico que contiene todos los suelos que no pudieron acomodarse en alguno de los otros GSR (*Group Soil Reference*, FAO, 2007). En la práctica, los Regosoles son suelos minerales muy débilmente desarrollados en materiales no consolidados que no tienen un horizonte mólico o úmbrico, no son muy someros ni muy ricos en gravas (Leptosoles), arenosos (Arenosoles) o con materiales flúvicos (Fluvisoles). Los Regosoles están extendidos en tierras erosionadas, particularmente en áreas áridas y semiáridas y en terrenos montañosos.
- Material parental: material no consolidado de grano fino.
- Ambiente: Todas las zonas climáticas sin permafrost y todas las alturas. Los Regosoles son particularmente comunes en áreas áridas (incluyendo el trópico seco) y en regiones montañosas.
- Desarrollo del perfil: Sin horizontes de diagnóstico. El desarrollo del perfil es mínimo como consecuencia de edad joven y/o lenta formación del suelo, como por ejemplo debido a la aridez.
- Los Regosoles cubren unas 260 millones de ha a nivel mundial, principalmente en áreas áridas en el centro oeste de Estados Unidos de Norteamérica y en el norte y centro norte de México, norte de África, el Oriente Próximo y Australia. En áreas de desierto tienen mínimo significado agrícola, en muchos casos se usan para pastoreo extensivo.

Para la clasificación según la *Soil WRB (World Reference Base* o Base Mundial de Referencia de suelos, IUSS, 2007), se encontraron los siguientes GSR o Grupos de Suelo de referencia (Figura 15), para los tres municipios implicados en las áreas de estudio (San Luis Potosí, Villa de Arriaga y Mexquitic de Carmona), a través de INEGI, Marco Geoestadístico Municipal 2005, versión 3.1. y la Serie II del Continuo Nacional de datos, cambiando un poco la clasificación obtenida en el entorno nacional, reubicando al área de estudio 1 Mesa de los Conejos dentro del grupo Leptosoles.

La característica principal de los Leptosoles reside en que son suelos muy someros sobre roca continua y extremadamente gravillosos y/o pedregosos con limitación severa para enraizamiento (IUSS, 2007), por lo que una vez realizados los análisis granulométricos se comprobó, como se demostrará en el apartado 5.1.3 (Resultados de Granulometría) de este texto, que había una discordancia entre el mapa obtenido de INEGI mostrado en la Figura 15 y los datos obtenidos de dichos análisis, en los que no se aprecia que exista una extrema proporción de la fracción gravas o superiores.

El tamaño del mapa mostrado en la Figura 15 ayuda a ubicar las áreas de estudio del proyecto dentro de los municipios ya nombrados y al ser a una escala mayor (1:50 000), con respecto a la de la Figura 14 (1:250 000), se reconoce la gran variabilidad de GSR que presentan los alrededores de las áreas de estudio.

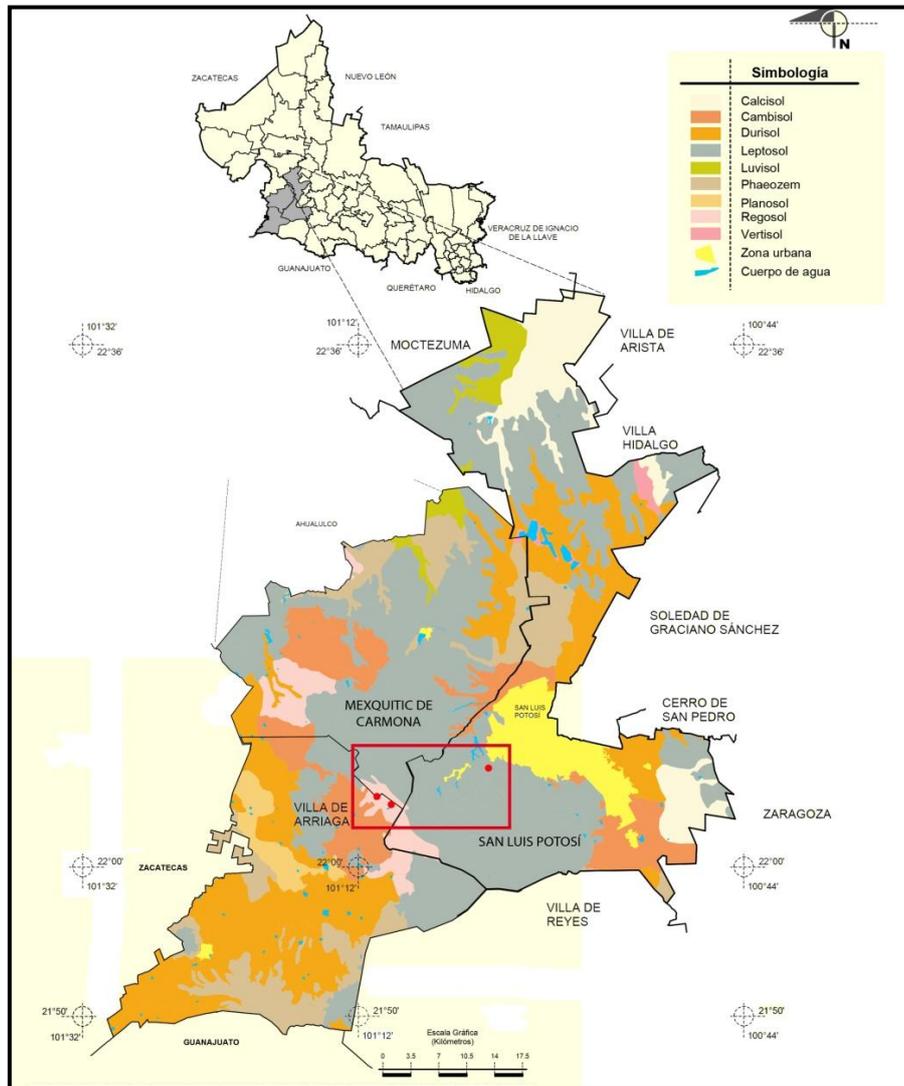


Figura 15. Grupos de suelos presentes en los municipios implicados en las áreas de estudio (San Luis Potosí, Villa de Arriaga y Mexquitic d Carmona). El recuadro rojo designa el marco general donde se ubican las tres áreas de estudio marcadas por los puntos, con esta clasificación, el área 1 Mesa de los Conejos se hallaría sobre Leptosoles y las áreas de estudio 2 y 3 sobre Regosoles. Fuente: Extraído de INEGI - Recursos Naturales - Edafología San Luis Potosí - 2007 clave: F14-4 escala: 1:250 000; INEGI. Marco Geoestadístico Municipal 2005, versión 3.1.; INEGI. Conjunto de Datos Vectorial Edafológico, Escala 1:250 000 Serie II (Continuo Nacional); INEGI. Información Topográfica Digital Escala 1:250 000 serie II.

Así pues debido a la falta de precisión que arrojaban los datos, se decidió realizar una descripción del perfil tipo de los suelos encontrados en las áreas de estudio, ya que las observaciones en las salidas a campo se comprobó que se trataba de unidades bastante parecidas, que desarrollaban todas una estructura del perfil muy semejante (Figura 16).

De este modo, se determinó la siguiente descripción del perfil tipo:

- Suelo sin horizonte superior mólico o úmbrico (tipo O) diferenciado, presenta costra semicompacta de baja permeabilidad y, de estructura de perfil mínimamente desarrollada, masiva, de unos 70 – 90 cm de espesor, sin horizontes de diagnóstico, excepto en las zonas de menor pendiente, donde si puede aparecer un horizonte arcilloso con indicios de incipiente pedogénesis por migración de arcillas, amplia variedad de materiales parentales, principalmente en materiales de textura fina no consolidados, presentan concreciones de yeso por acumulación, de color amarillento a café claro grisáceo, oscureciéndose más cuando aparece el horizonte árgico, por toda la descripción posible REGOSOL o cambiando a LIXISOL Árido (Soil WRB, IUSS, 2007) según la pendiente de la ladera.

LIXISOLES (IUSS, 2007)

- Los Lixisoles comprenden suelos que tienen mayor contenido de arcilla en el subsuelo que en el suelo superficial como resultado de procesos pedogenéticos (especialmente migración de arcilla) llevando a un horizonte *árgico* en el subsuelo. Los Lixisoles tienen alta saturación con bases y arcillas de baja actividad a ciertas profundidades.
- Connotación: Suelos con diferenciación pedogenética de arcilla (especialmente migración de arcilla) entre el suelo superficial con menor contenido, y el subsuelo con mayor contenido de arcilla, arcillas de baja actividad y saturación con bases en alguna profundidad; del latín *lixivia*, sustancias lavadas.
- Material parental: En una variedad amplia de materiales parentales, principalmente en materiales de textura fina no consolidados, fuertemente meteorizados químicamente.
- *Ambiente*: Regiones con clima tropical, subtropical o templado cálido con una estación seca pronunciada, principalmente en antiguas superficies de erosión o depósito. Muchos Lixisoles se supone que son suelos poligenéticos con características formadas bajo un clima más húmedo en el pasado.
- Desarrollo del perfil: Diferenciación pedogenética del contenido de arcilla con un contenido menor en el suelo superficial y un mayor contenido en el subsuelo, meteorización avanzada sin una lixiviación marcada de cationes básicos.
- Manejo y uso de Lixisoles: Las áreas con Lixisoles que todavía están bajo vegetación forestal abierta son muy utilizados para pastoreo de bajo volumen. La preservación del suelo superficial con su tan importante materia orgánica es de máxima importancia. El suelo superficial degradado tiene baja estabilidad de agregados y es proclive a la disgregación y/o erosión cuando es expuesto directamente al impacto de las gotas de lluvia. La labranza de suelos mojados o el uso de maquinaria excesivamente pesada compacta el suelo y causa serio deterioro de la estructura.

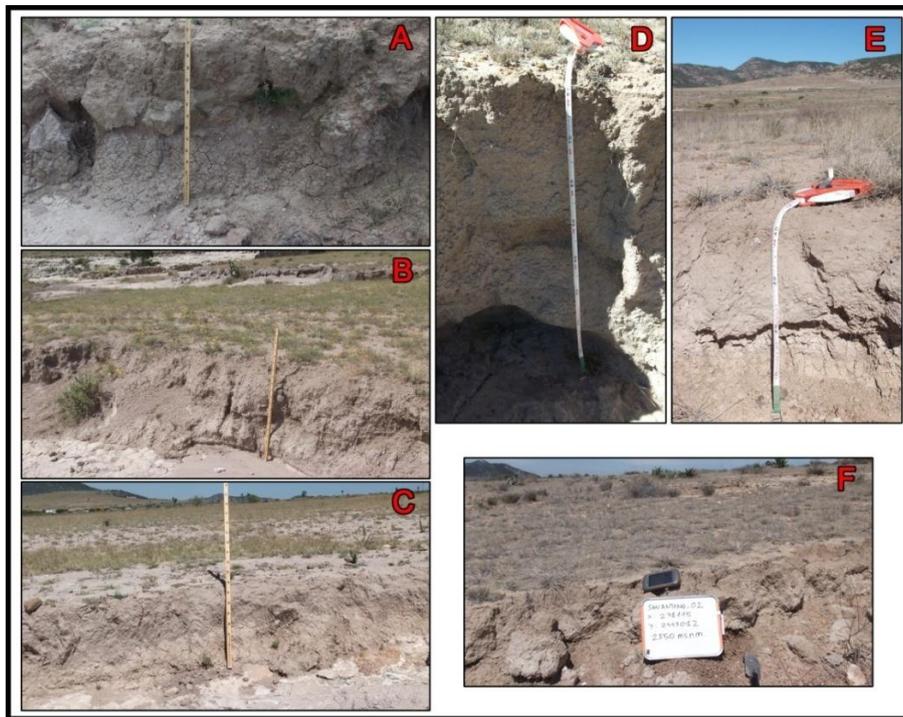


Figura 16. Imágenes de los perfiles de suelo presentes en las áreas de estudio. Por orden de aparición de las áreas de estudio A (MC_01), B (TP_01), C (TSA_01), D (MC_02), E (TP_02) y F (TSA_02). Se observa que los perfiles son muy semejantes en color y estructura interna y superficial. Fuente: fotografías propias realizadas en las salidas a campo.

2.7. Hidrografía del área de Estudio.

Las áreas de estudio se encuentra como ya es sabido, en el estado de San Luis Potosí, pero repartidas entre dos subcuencas, conocidas como Sartenedo y San Luis, pertenecientes a las cuencas Presa de San José-Los Pilares y San Luis Potosí respectivamente, estando ambas cuencas dentro de la Región

Hidrográfica conocida como El Salado, tal y como se puede apreciar en la Figura 17, siendo todas ellas de tipo endorreico de ambiente árido.

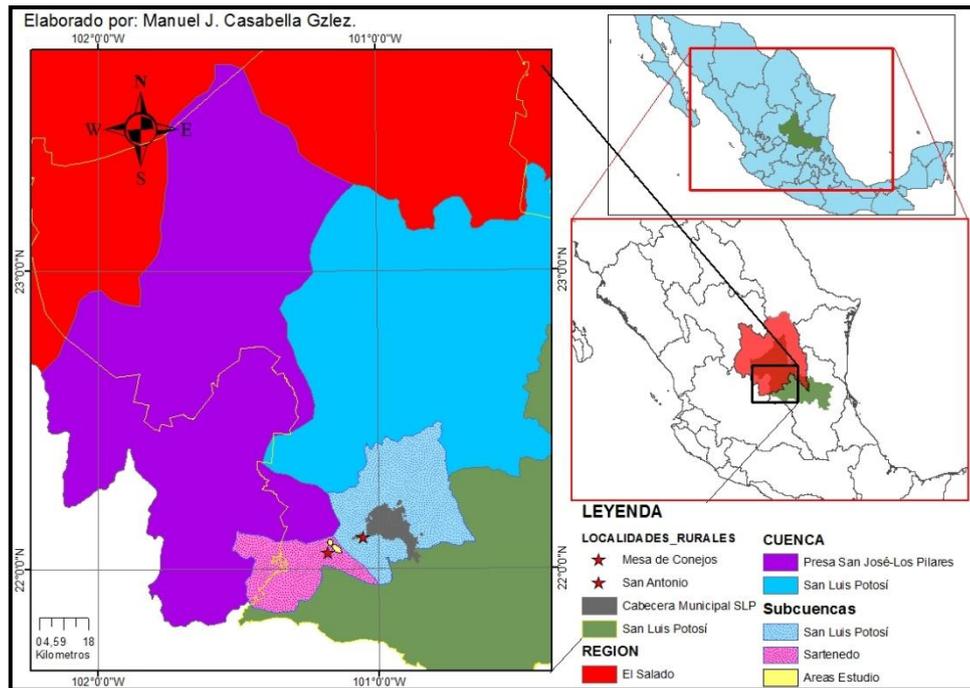


Figura 17. Región Hidrográfica, Cuencas y Subcuencas de las áreas de estudio. Ubicación de las áreas de estudio en las respectivas cuencas y subcuencas hidrográficas. El A.E 1 (MC) se ubica sobre la marca de la localidad rural del mismo nombre, la escala del mapa sólo permite ver la localidad rural. Sobre el mapa secundario se observa la Región Hidrográfica, a la que pertenecen las A.E., en rojo. La línea amarilla y el relleno verde corresponde al límite del estado de San Luis Potosí. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de INEGI

Tabla 9. Hidrología general, nombres de cuencas, subcuencas, cuerpos y corrientes de agua de los municipios implicados en las áreas de estudio. Fuente: Extraído de INEGI - Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos, San Luis Potosí, Clave geoestadística 24028, Villa de Arriaga, Clave geoestadística 24046, Mexquitic de Carmona, Clave geoestadística 24021 SLP, 2009

	San Luis Potosí	Villa de Arriaga	Mexquitic de Carmona
Región hidrológica	El Salado (90.3%) y Pánuco (9.7%)	El Salado (68.7%), Pánuco (23.6%) y Lerma Santiago (7.7%)	El Salado (100%)
Cuenca	Presa (P.) San José–Los Pilares y Otras (89.2%), R. Tamuín (9.7%) y San Pablo y Otras (1.1%)	San Pablo y otras (68.2%), R. Tamuín (23.6%), R. verde Grande (7.7%) y P. San José-Los Pilares y Otras (0.5%)	Presa San José-Los Pilares y otras (72%) y San Pablo y otras (28%)
Subcuenca	P. San José (83%), R. Santa María Alto (9.7%), P. Los Pilares (6.2%) y P. San Pablo (1.1%)	R. San Pablo (68.2%), R. Santa María Alto (23.6%), C. C. Ocampo (7.7%) y P. San José (0.5%)	P. San José (72%) y P. San Pablo (28%)
Corrientes de agua	Intermitentes: Potosino y Bocas	Intermitentes: El Tecolote y El Ancón	Intermitentes: La Parada, Álvaro Obregón, Arroyo Seco, Las Calabacillas, Juachín, La Matanza, Arroyo Grande y Mexquitic
Cuerpos de agua	Perennes (0.1%): San José, Cañada de Lobo, Gonzálo N. Santos y El Potosino Intermitentes (0.7%)	Intermitentes (0.6%): Laguna El Carmen, San Miguel y Laguna Colorada	Perenne (0.2%): Alvaro Obregón Intermitentes (0.1%): Santa Genoveva, La Parada, Rivera y Laguna El Pato

En particular, ya dentro de las áreas de estudio la mayor parte del agua que encontramos en superficie se debe a los escurrimientos de las precipitaciones y a arroyuelos espontáneos de carácter intermitente. En la Figura 18 se puede observar una gran cantidad de cursos de agua que rodean las áreas de estudio, pero en su gran mayoría son de las características mencionadas, más que cursos del tipo primario. En el área de estudio 1 (MC), que está enmarcada dentro de la cuenca y subcuenca de San Luis Potosí, a escala 1:50.000, que es con la que está confeccionada la red hidrográfica utilizada para la realización de este mapa, no se aprecia si quiera flujos intermitentes de escorrentía, pero por los registros de las

salidas a campo, se conoce que existen vías de escorrentía que incluso parecían haber sufrido algún intento de encauzamiento con el propósito de realizar una mínima cosecha de agua hacia una represa situada casi en la línea NE que delimita esta área, junto a campos de aprovechamiento agrícola. De las áreas 2 (TP) y 3 (TSA) el único curso continuo constatado en las salidas a campo es el que cruza longitudinalmente el subárea TP_01, de hecho siguiendo su curso y llegando casi al límite del área recientemente se construyó una represa para abastecer las necesidades de la nueva carretera del periférico de San Luis Potosí cuyas obras cruzan justo entre las dos áreas de estudio. En el área TP_02 el arroyo que hay marcado es de carácter intermitente y tiene un profundo sentido de uso agrícola, de hecho, como ya se nombró es un áreas donde se han trabajo diversas estructuras que conducen el agua hacia dos represas en el intento de abastecer los campos y cultivos colindantes. En el área de estudio 3 (TSA) de los cursos marcados en el mapa tan sólo el que está más al sur suele llevar una carga constante, de hecho también termina en una presa de tamaño medio que sirve de para satisfacer las necesidades del área agrícola de San Antonio, el curso más al norte no se detectó ningún tipo de conducción en las distintas visitas de campo que se realizaron durante la duración de los estudios, por lo que queda como curso intermitente dependiente de las precipitaciones, si cabe, en su parte más al W, donde se unía al curso que provenía del área 2, era donde solía convertirse en continuo pero la realización de la represa para los trabajos viales cambio este hecho.

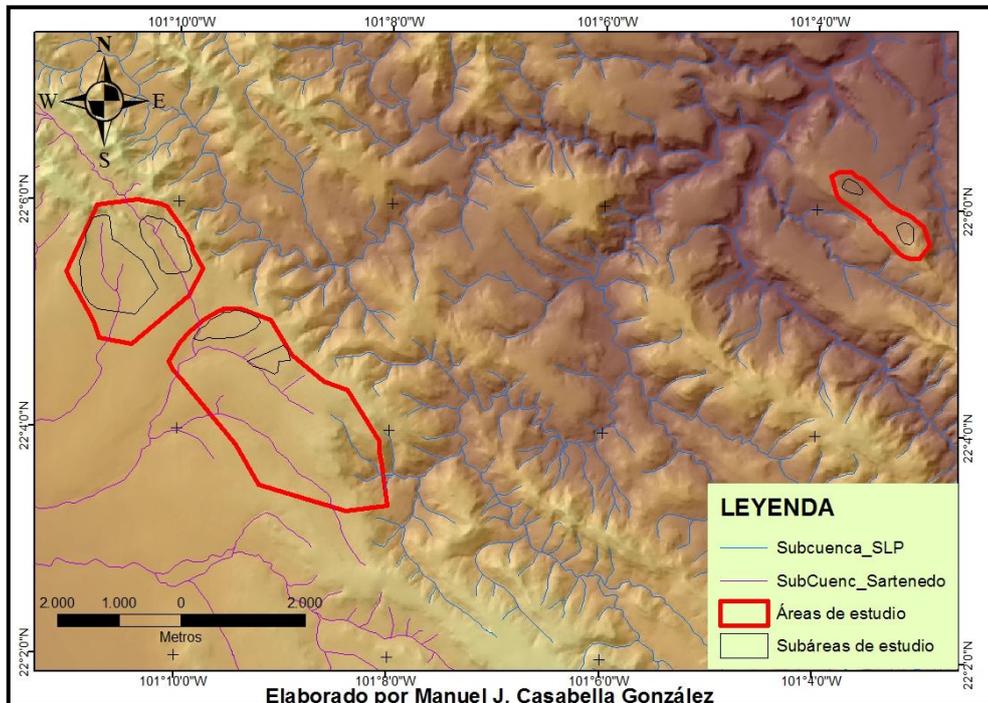


Figura 18. Hidrología superficial y adyacente a las áreas de estudio. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos y *Shapes* de INEGI

2.8. Climatología atribuible al área de Estudio

La climatología general de los principales municipios que abarcan las áreas de estudio se detallan en la siguiente tabla a continuación:

Tabla 10. Climatología general y tipos de climas de los municipios implicados en las áreas de estudio. Fuente: Extraído de INEGI - Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos, San Luis Potosí, Clave Geoestadística 24028, Villa de Arriaga, Clave G. 24046, Mexquitic de Carmona, Clave G. 24021 SLP, 2009

	San Luis Potosí	Villa de Arriaga	Mexquitic de Carmona
Rango de temperatura	12-20°C	12-18°C	14-18°C
Rango de precipitación	200-600 mm	400-600 mm	200-500 mm
Clima	Seco templado (34.3%), Semiseco templado (23.7%), Muy seco templado (22.7%), Muy seco semicálido (13.1%) Seco semicálido (6.2%)	Semiseco templado (100%)	Semiseco templado (53.9%) Muy seco templado (31.7%) Seco templado (14.4%)

Como se puede observar en la Figura 19 el clima que abarca todas las áreas de estudio está determinado por INEGI como Semiseco-Templado.

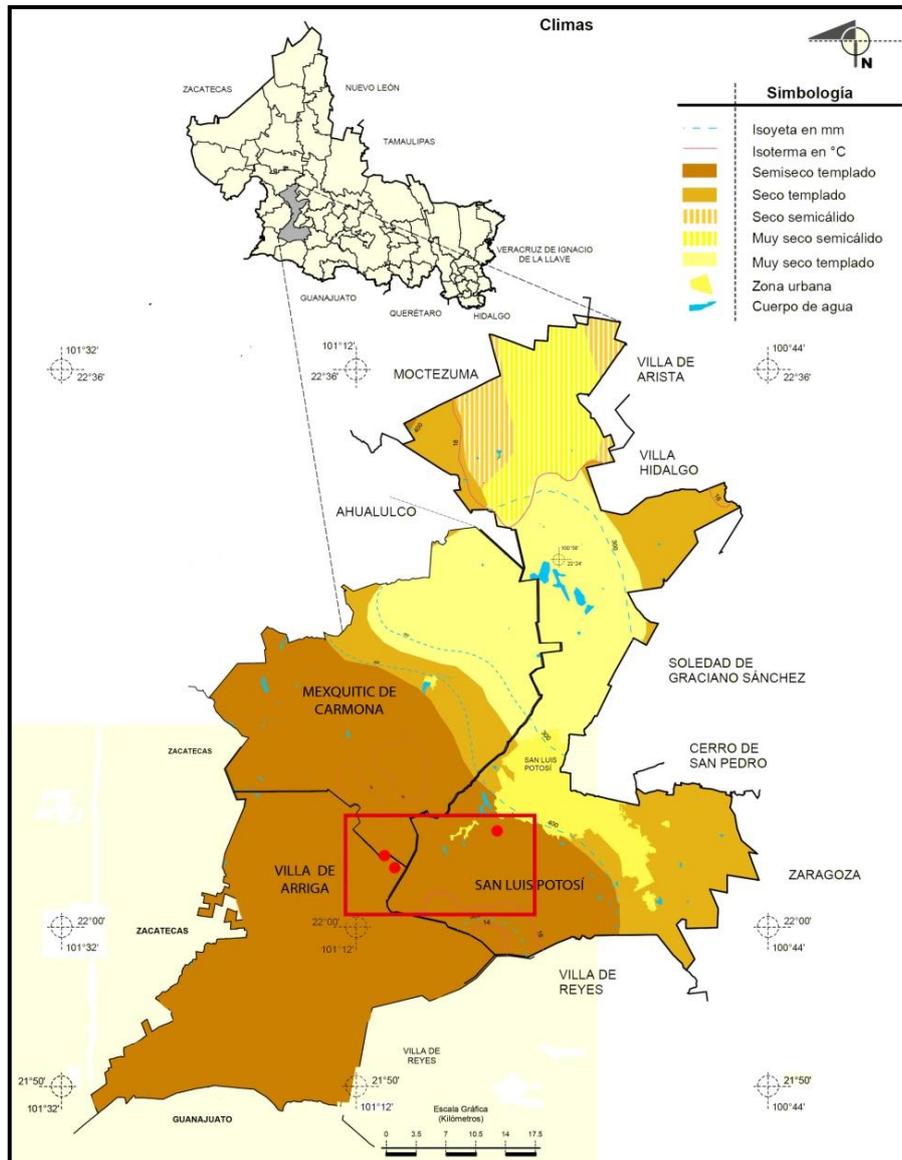


Figura 19. Tipos de climas presentes en los principales municipios que abarcan las áreas de estudio, las cuales se encuentran marcadas con puntos rojos dentro del recuadro. Fuente: Extraído de INEGI - Recursos Naturales - Edafología San Luis Potosí - 2007 clave: F14-4 escala: 1:250 000

Para determinar una climatología que correspondiera lo más exactamente posible a las áreas de estudio se realizó una aproximación por interpolación en isoyetas, de los datos recogidos de 4 estaciones climatológicas (Est. 24024 El Peaje, Est. 24078 Santiago, Est. 24111 San Luis, Est. 32127 Pino Suarez), con respecto a la climatología diaria y mensual, las normales meteorológicas, los valores extremos y las estadísticas generales, todos estos datos incluían, entre otros, los datos con respecto a la temperatura y a las precipitaciones. Estas cuatro estaciones delimitan un triángulo que incluye perfectamente en su interior las áreas de estudio, estando una de ellas en un punto central intermedio entre las áreas como se puede observar en la Figura 20, donde también se proyecta una supuesta área de influencia en tono salmón, quedando abarcada el área por completo. A través de la consideración de las cuatro estaciones presentadas, se realizaron las estimaciones de climatología específica de las áreas de estudio determinando una variación climática anual con temperaturas de 24.95 y 8.4°C de máxima y mínima respectivamente, con una media anual de 16.65°C, así mismo se determinó una media de precipitación anual de 399.5 mm de columna de agua (Tabla 11).

Tabla 11. Promedios de las Estaciones Meteorológicas consideradas en el estudio. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos descargados del Servicio Meteorológico Nacional (SMN)

Estaciones Meteorológicas	Temperatura			Precipitación	Años con datos
	Máxima anual	Media Anual	Mínima Anual	Media anual	
Peaje	24.3	16.9	9.6	416.7	44.75
Santiago	25	16.2	7.4	405.8	43
San Luis	26	17.6	9.3	360.2	31.25
Pino Suarez	24.5	15.9	7.3	415.6	27.75
Promedios	24.95	16.65	8.4	399.575	

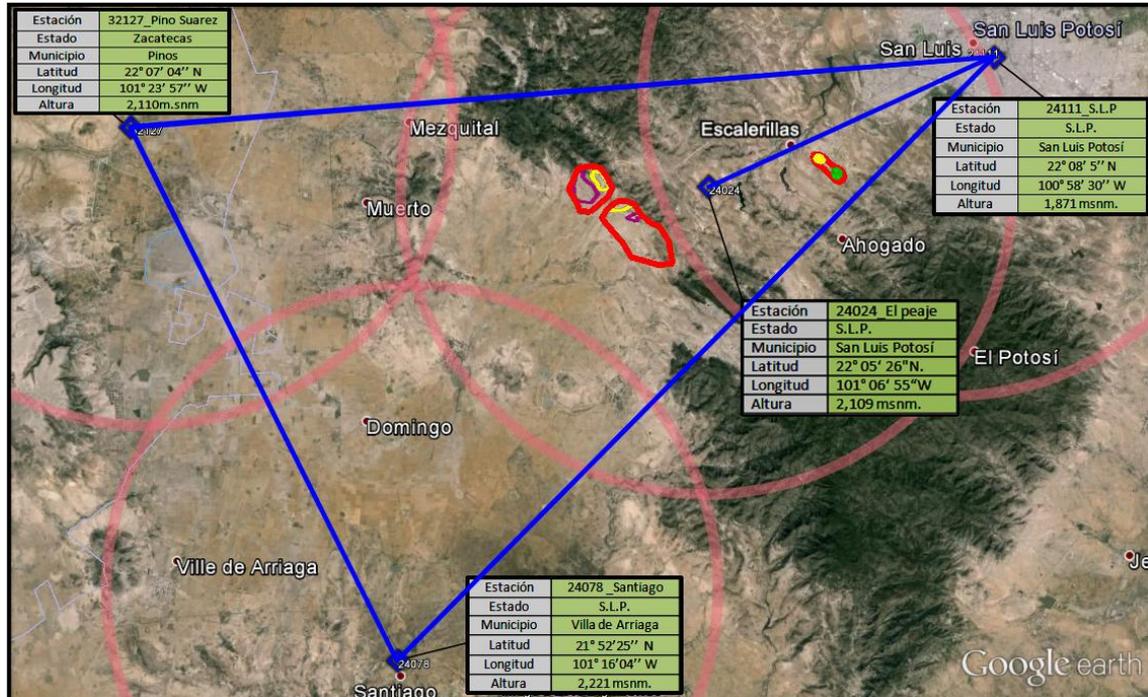


Figura 20. Ubicación de las estaciones meteorológicas usadas para definir los datos climatológicos relevantes de las áreas de estudio. Los círculos color salmón corresponde al área de influencia de las estaciones climatológicas, los rombos azules a la ubicación geográfica de la estación. Fuente: Elaboración propia a partir de imágenes Google Earth 2015 y los datos de SEMARNAT (2015) - CONAGUA - SMN Red De Estaciones Climatológicas, para Google Earth, Imagen del área de la Sierra de San Miguelito fecha 24/02/2015, obtenida 05/06/2015

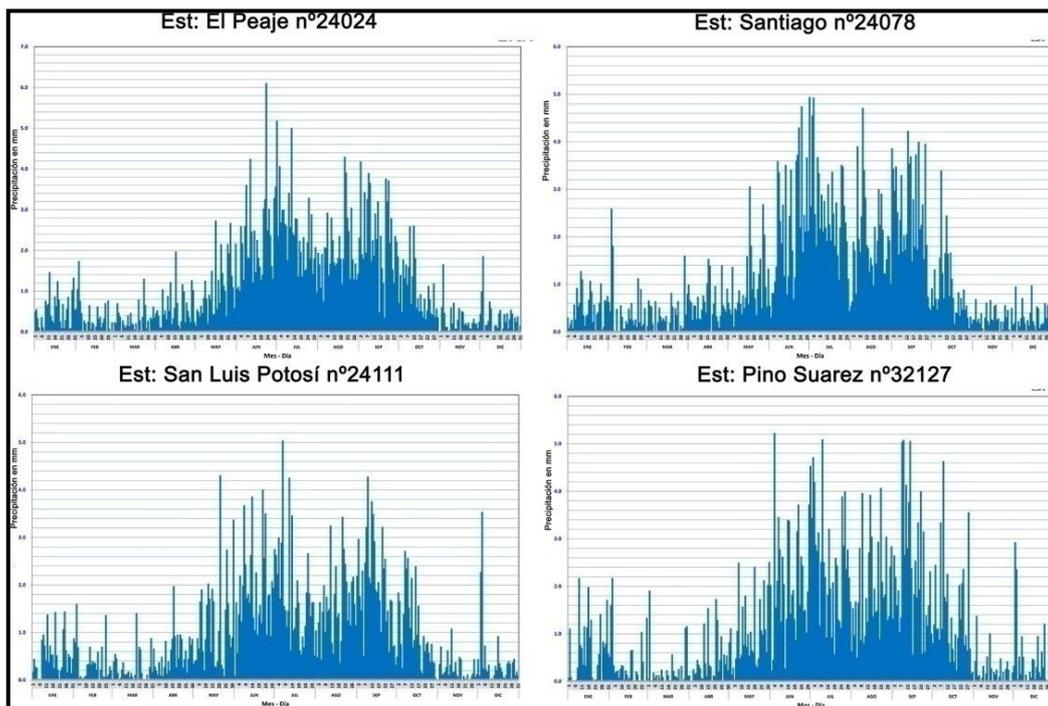


Figura 21. Precipitación anual de las estaciones consideradas. Las gráficas consideran la distribución anual del promedio diario de precipitación en todos los años con datos (entre los años 1960 y 2012). Fuente: Servicio Meteorológico Nacional (SMN) datos estadísticos de las estaciones (SEMARNAT, 2015).

Se aprecia de las gráficas de pluviometría y precipitación (Figura 21) una clara estacionalidad de las lluvias que ocupa alrededor de 6 meses entre mayo y octubre, presentando una forma burdamente de campana de Gauss bimodal, con un pico sobre los meses de junio - julio y otro sobre el mes de septiembre.

El máximo nivel de precipitación anual de la zona, se alcanza para las áreas de estudio 2 (TP) y 3 (TSA) mientras que el área 1 (MC) se sitúa en un rango menor como se observa en las gráficas de la Figura 22, aún así son regímenes hídricos bajos, como cabe esperar de una zona con el clima descrito Semiseco Templado. Aquellos climas áridos que reciben montos de precipitaciones entre 250mm y 500mm, y generalmente concentradas en unos pocos meses del año, se denominan biomas de semidesiertos. Estos se desarrollan en áreas de relieve irregular y en suelos pobres en materia orgánica.

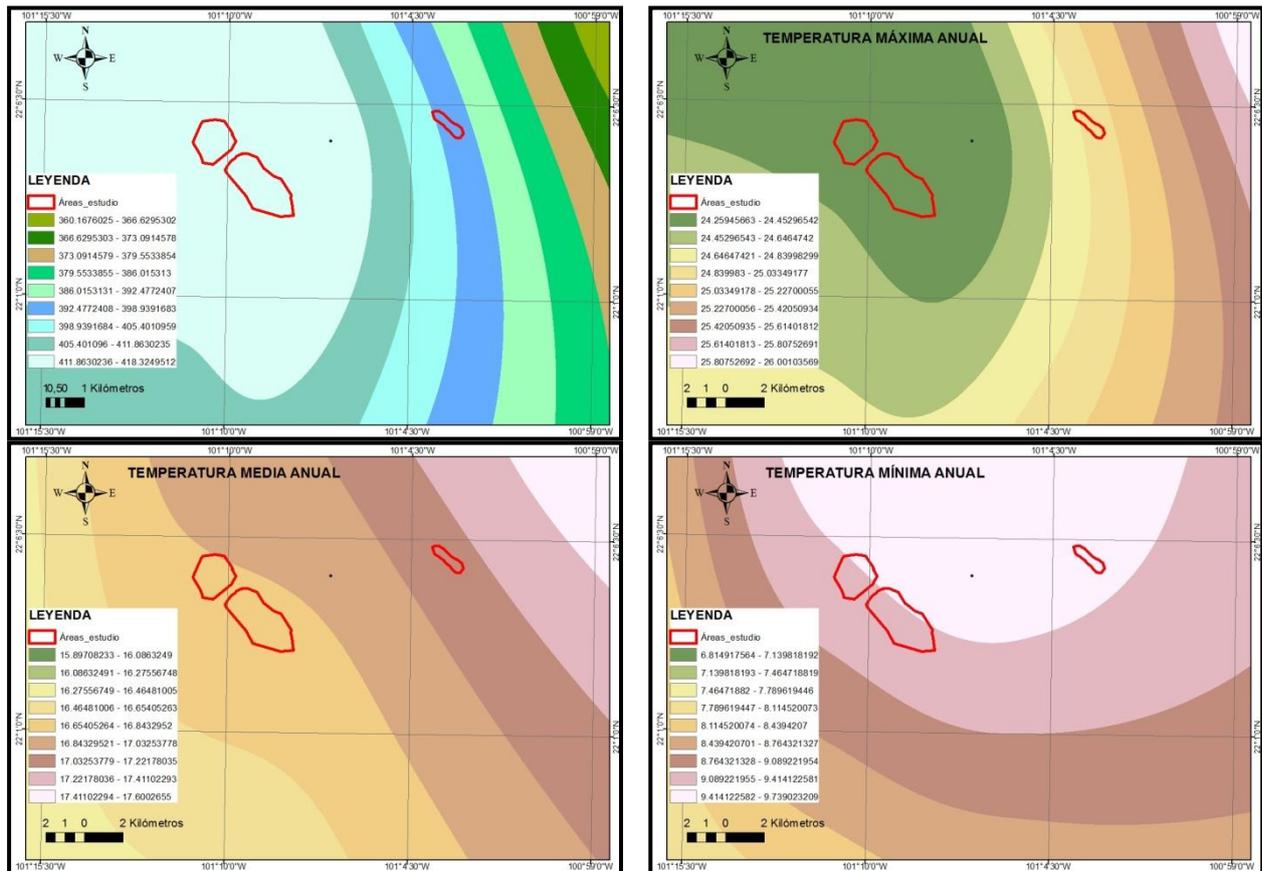


Figura 22. Isoyetas de precipitación e isolíneas de temperatura en temporalidad anual. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de las estaciones del Servicio Meteorológico Nacional (SMN).

De las gráficas de temperatura (Figura 22) se extrae la confirmación de el área como un clima árido semidesértico con gran variabilidad entre sus máximas y mínimas de más de 15°C entre sus medias. Estos cambios drásticos de temperatura, que suelen darse principalmente dentro de un mismo día como diferencia entre el día y la noche suelen afectar a las propiedades de los suelos, la desertificación y la formación de costras superficiales.

3. Desarrollo metodológico: análisis fundamentales, evaluación de la erodibilidad y del proceso

3.1. Descripción inicial de la metodología.

El procedimiento metodológico para la evaluación de la erosión hídrica que se utilizó en esta investigación supuso un tratamiento clásico, integrado por las actividades fundamentales de trabajo de gabinete, trabajo de campo y trabajo de laboratorio.

Se diseñó una línea de programación de actividades, a fin de abordar el escalamiento temporal de los pasos del proyecto, donde se incluyeron las actividades fundamentales pero separadas en 6 líneas de actividad:

Línea de Actividad 1. Trabajo de gabinete etapa inicial:

recolección de material de estudios anteriores, recolección de mapas geológicos, edafológicos, y topográficos, imágenes satelitales a alta resolución, base datos climatológicos y pluviométricos, mapas en SIG definitorios del marco general de las áreas de estudio.

Línea de Actividad 2. Trabajo de campo:

muestreo de suelos; mediciones de propiedades relacionadas con la erosión; identificación posibles procesos de inestabilidad superficial y de las áreas más afectadas por procesos de erosión hídrica.

Línea de Actividad 3. Trabajo de laboratorio:

determinaciones de granulometría, contenido de materia orgánica, cationes intercambiables, análisis por difracción de rayos X, dispersividad, etc., en las muestras recogidas en campo.

Línea de Actividad 4. Trabajo de gabinete etapa final A. Análisis de datos y modelado numérico:

cálculo de los coeficientes de erodibilidad, erosividad, índice de conectividad, cálculo mapa de erosión potencial e identificación de las áreas de fuente primaria de sedimentos.

Línea de Actividad 5. Trabajo de gabinete etapa final B. Mapeo y síntesis de resultados:

creación de los mapas finales/resultados, síntesis y discusión de resultados.

Línea de Actividad 6. Redacción final de la presente tesis.

A continuación se describen las tres actividades fundamentales del desarrollo metodológico usado.

3.2. Trabajo de Gabinete

El trabajo de gabinete fue un proceso constante durante la realización del proyecto, ya que constaba de una etapa inicial (Línea de Actividad 1) desarrollada previamente a los otras dos actividades fundamentales y una final que se solapaba y sobrepasaba a los otras dos actividades fundamentales (Líneas de Actividad 4 y 5), es decir, al trabajo de campo y de laboratorio. Así pues se llevó a cabo en las citadas dos etapas, que constan de los siguientes apartados:

- Etapa inicial
 - ~ recopilación y revisión de la literatura especializada necesaria para un buen ordenamiento del trabajo
 - ~ primeras percepciones sobre la problemática
 - ~ delimitación del área de estudio
 - ~ preparación de los recorridos preliminares por las áreas de estudio,
 - ~ recopilación y sistematización de la información a través de sistemas de información geográfica (SIG)
 - ~ interpretación preliminar de las imágenes de satélite
 - ~ realización de los mapas definitorios del marco general de las áreas de estudio
- Etapa final
 - ~ estructuración de los resultados obtenidos a través de la metodología desarrollada
 - ~ desarrollo del modelo numérico y el modelo comparativo
 - ~ realización de los mapas finales/resultados de la distribución espacial de las propiedades de los suelos, de la distribución de la conectividad hidrológica, de la erodibilidad y de la erosión potencial en las áreas de estudio

3.2.1. Recopilación bibliográfica e inventariado

Se realizó una separación de los estudios (tesis doctorales, de maestría o de grado), libros y artículos relacionados al tema del proyecto, la erosión hídrica, en tres niveles, nivel internacional, nacional y estatal, y se encontró abundante bibliografía en los niveles internacional y nacional y algo menor en

cantidad en el nivel estatal. A fin de no citar aquí cada uno de ellos será citado un breve resumen del material recopilado por niveles.

- ~ A nivel internacional existe abundante literatura por lo que se tuvo que restringir la recopilación de trabajos, pero aun así se seleccionaron más de 80 títulos entre libros y artículos contando con los textos de los modelos de erosión principales usados en este proyecto (USLE, RUSLE, PSIAC y MPSIAC) y varios documentos y libros sobre técnicas analíticas de laboratorio y estándares internacionales (ASTM, ISO).
- ~ A nivel nacional también existe abundante bibliografía y finalmente se seleccionaron más de 32 títulos de libros y estudios intentando recopilar aquellos más significativos y recientes, por lo que van desde 2001 hasta 2014, entre ellos se cuenta con textos oficiales del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) y la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR), también para las técnicas de laboratorio se usó la norma oficial mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000 que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis. Por otro lado en la recopilación de materiales cartográficos y metadatos de uso en los sistemas de información geográfica se descargaron numerosos archivos del INEGI, y algunos relativos a la hidrografía de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA).
- ~ A nivel estatal se hizo uso de varios documentos de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA), como son los libros técnicos nº 1 y nº3, también se seleccionaron algunos estudios de localidades determinadas, para la cartografía se usó la "Carta Geológico Minera F14A83 Tepetate" del Servicio Geológico Mexicano y para la descripción de la geología del área de estudio el Folleto Técnico nº 114 del Instituto de Geología y algunos artículos relacionados. También se descargaron metadatos estatales de uso SIG del INEGI, y algunos relativos a la hidrografía de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA).
- ~ También se realizó un catálogo de imágenes del satélite SPOT de las que se seleccionó la imagen con la que se realizó el modelo digital de elevación (MDE) para la posterior sistematización de la información a través del programa SIG ArcGIS® v.9.3, programa con el que se realizaron todos los mapas propios presentados en este texto.
- ~ Así mismo se descargaron los datos de las estaciones climáticas más cercanas a las áreas de estudio (en total 7 estaciones), y se obtuvo un registro superior a 30 años de datos de precipitaciones y temperaturas.

3.2.2. Primeras percepciones sobre la problemática

Una vez determinados el tema de estudio, la hipótesis y las preguntas de investigación derivadas para el presente proyecto, se procedió a la búsqueda de las ubicaciones de las áreas de estudio donde se pudieran realizar los trabajos de campo, en base a zonas donde se presentara una erosión muy desarrollada de las categorías fuerte y extrema, siempre dentro de los límites del proyecto superior "*Estudio geotécnico e hidrológico para la evaluación del peligro geomorfológico de la sierra de San Miguelito, San Luis Potosí, SLP, México*" (PROMEP uaslp-ptc-372), y se definieron, de este modo, las 3 áreas de estudio ya descritas en el apartado 3 del presente texto.

Del mismo modo se prepararon los recorridos de evaluación de las áreas de estudio a fin de constatar que efectivamente eran meritorias de realizar sobre ellas trabajos de campo, dando esta operación resultados positivos, en base a los rangos de erosión observados y en comparación con las imágenes históricas obtenidas a través del programa *Google Earth*® que mostraron cómo en los últimos años los problemas de erosión se habían incrementado considerablemente.

Como los procesos erosivos son más bien de carácter regional, de acuerdo a los principios que regulan las cuencas hidrográficas y las áreas de estudio seleccionadas no alcanzaban a cumplir con tales dimensiones, quedando en todo caso como laderas o partes pequeñas de una microcuenca, fue que se determinó que el estudio a realizar y el modelo final, debía tener una base empírica de modo que los datos fueran representativos para tal escala de trabajo, sin olvidar que eran puntos particulares de sistemas más generales y que el modelo final sería de base física y por tanto semiempírico, ya que algunos de los datos serían estimados en base a ecuaciones específicas.

En consecuencia, respecto a la problemática de la erosión, se debe considerar el área de estudio como un sistema abierto en el cual entra y sale materia y energía, por lo que está relacionado con los sistemas que lo rodean o engloban, y que además está constituido por una serie de subsistemas que también se relacionan entre sí y con los sistemas que se ubican fuera del área de estudio, y

estas consideraciones debían ser incluidas en el estudio.

Así pues, como ya se citó en este texto, el reto fue consensuar los factores directamente dependientes del proceso de erosión en sí, que llevaran implícitas las características climáticas y temporales, las propiedades intrínsecas del suelo, físicas y químicas, los factores topográficos, las premisas de conservación de la masa y la energía, la interacción de los sistemas y subsistemas internos y externos, las consideraciones socio culturales del área y los factores ambientales y del ecosistema donde se llevó a cabo el proyecto.

3.2.3. Sistemas de información geográfica

Los sistemas de información geográfica (también conocidos por los acrónimos SIG en español o *GIS* en inglés) son un conjunto de herramientas que integran y relacionan diversos componentes (tales como usuario, *hardware*, *software* y procesos) permitiendo de este modo la organización, almacenamiento, manipulación, análisis y modelización de grandes cantidades de datos procedentes del mundo real que están vinculados a una referencia espacial, facilitando la incorporación de aspectos sociales-culturales, económicos y ambientales que conducen a la toma de decisiones de una manera más eficaz. (*Wikipedia*[®])

El SIG, definido por Burrough (1986), es un “poderoso conjunto de herramientas para coleccionar, almacenar, recuperar, transformar y exhibir datos espaciales referenciados al mundo real”. Para ser capaz de realizar estas operaciones y todavía disponer de entrada y salida de datos en diversos formatos, el SIG normalmente integra otros sistemas diversos (ej: procesamiento digital de imágenes, análisis estadístico, análisis geográfico, digitalización), teniendo como punto central, un banco de datos (Vieira-Rocha, 1998, citado en Giménez-Suarez, 2008).

En el sentido más estricto, es cualquier sistema de información capaz de integrar, almacenar, editar, analizar, compartir y mostrar la información geográficamente referenciada. En un sentido más genérico, los SIG son herramientas que permiten a los usuarios crear consultas interactivas, analizar la información espacial, editar datos, mapas y presentar los resultados de todas estas operaciones.

Los SIG tienen dos características o elementos esenciales, una imagen que se asocia con un atributo de información. De este modo es que funciona como una base de datos con información geográfica (datos alfanuméricos) que se encuentra asociada por un identificador común a los objetos gráficos de los mapas digitales. Así la rutas de conocimiento de la información tienen doble sentido ya que si se señala alguna parte, objeto o punto de un mapa se pueden conocer sus atributos y a la inversa, preguntando por un registro de la base de datos se puede saber su localización en la cartografía.

La razón fundamental para utilizar un SIG es la gestión de información espacial. El sistema permite separar la información en diferentes capas temáticas y las almacena independientemente, permitiendo trabajar con ellas de manera rápida y sencilla, facilitando al profesional la posibilidad de relacionar la información existente a través de la topología geoespacial de los objetos, con el fin de generar otra nueva que no podríamos obtener de otra forma.

Las modernas tecnologías SIG trabajan con información digital, para la cual existen varios métodos utilizados en la creación de datos digitales. El método más utilizado es la digitalización, donde a partir de un mapa impreso o con información tomada en campo se transfiere a un medio digital por el empleo de un programa de Diseño Asistido por Ordenador (DAO o CAD) con capacidades de georreferenciación.

Dada la amplia disponibilidad de imágenes orto-rectificadas (tanto de satélite y como aéreas), la digitalización por esta vía se está convirtiendo en la principal fuente de extracción de datos geográficos. Esta forma de digitalización implica la búsqueda de datos geográficos directamente en las imágenes aéreas en lugar del método tradicional de la localización de formas geográficas sobre un tablero de digitalización.

La representación de los datos

Los datos SIG representan los objetos del mundo real (carreteras, el uso del suelo, altitudes). Los objetos del mundo real se pueden dividir en dos abstracciones: objetos discretos (una casa) y continuos (cantidad de lluvia caída, una elevación). Existen dos formas de almacenar los datos en un SIG: *raster* y vectorial.

Los SIG que se centran en el manejo de datos en formato vectorial son más populares en el mercado. No obstante, los SIG *raster* son muy utilizados en estudios que requieran la generación de capas continuas, necesarias en fenómenos no discretos; como en estudios geológicos,

medioambientales, climáticos, etc., donde no se requiere una excesiva precisión espacial (distribución de temperaturas, análisis geológicos, distribución de propiedades del suelo, análisis pluviométricos, etc.).

Un *raster* es cualquier tipo de imagen digital representada en mallas. Los SIG raster o de retícula dividen el espacio en celdas regulares donde cada una de ellas representa un único valor, de manera que es muy adecuado para la representación de variables continuas en el tiempo ya que se centra más en las propiedades del espacio más que en la precisión de la localización. A menudo se usan imágenes reales (fotografías aéreas, mapas geológicos, etc.) para mostrar una imagen detallada utilizada como mapa base sobre la que posteriormente se realizarán labores de digitalización. Cada celda (también llamada *pixel*) puede ser un valor discreto, como el uso del suelo, valores continuos, como temperaturas, o un valor nulo si no se dispone de datos. La resolución del conjunto de datos *raster* es el ancho de la celda en unidades sobre el terreno.

Los datos vectoriales centran el interés de las representaciones en la precisión de localización de los elementos geográficos sobre el espacio, y sobre aquellos objetos o fenómenos son de límites definidos (objetos discretos). Para modelar digitalmente las entidades del mundo real se utilizan tres elementos geométricos: el punto, la línea y el polígono. Los puntos se utilizan para las entidades geográficas que pretenden como referencia la simple ubicación o también se pueden utilizar para representar zonas a una escala pequeña dependiendo de la escala del mapa (por ejemplo una ciudad en un mapa mundial). Las líneas unidimensionales o polilíneas son usadas para rasgos lineales como ríos, caminos, ferrocarriles, rastros, líneas topográficas o curvas de nivel, sobre las que puede medirse la distancia. Los polígonos bidimensionales se utilizan para representar elementos geográficos que cubren un área particular de la superficie de la tierra. Estas entidades pueden representar lagos, límites de parques naturales, edificios, provincias, o los usos del suelo, por ejemplo. Los polígonos transmiten la mayor cantidad de información en archivos con datos vectoriales y en ellos se pueden medir el perímetro y el área.

Antes de analizar los datos en el SIG la cartografía debe estar toda ella en una misma proyección y sistemas de coordenadas. Para ello muchas veces es necesario reproyectar las capas de información antes de integrarlas en el sistema de información geográfica. La proyección es un componente fundamental a la hora de crear un mapa. Una proyección matemática es la manera de transferir información desde un modelo de la Tierra, el cual representa una superficie curva en tres dimensiones, a otro de dos dimensiones como es el papel o la pantalla de un ordenador.

Finalmente con los SIG se pueden realizar cálculos y representaciones muy diversas que incluyen entre otras, además del análisis espacial, el modelado digital de elevación (MDE o DEM en inglés, donde se incluyen características topológicas, hídricas, de erosión, geográficas, etc. y se pueden analizar en un entorno 3D), la creación de redes de interconexión o rutas óptimas, la superposición de mapas para calcular varios conjuntos de datos espaciales (con la posibilidad de ponderar determinadas coberturas que asignen el grado de importancia de diversos factores en un fenómeno geográfico), el cálculo de geoestadísticas, la geocodificación.

3.2.3.1. Realización de los mapas definitivos del marco general de las áreas de estudio

Todos los mapas de elaboración propia presentados en el apartado 2 "Marco geológico del área de estudio" del presente texto, se realizaron a través del programa SIG *ArcGIS*® v.9.3, para el tratamiento de algunas imágenes previo o posterior a su manejo en el programa SIG se usó el programa *Adobe Photoshop*® CS6 (64 bits). La base de metadatos fue recopilada principalmente de las instituciones oficiales con páginas web disponibles, principalmente del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), y en menor medida de la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) y la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA).

El mapa referente a la división edafológica de las áreas de estudio se realizó mediante la digitalización de la Carta Geológico Minera Tepetate F14-A83 San Luis Potosí, del Servicio Geológico Mexicano, 2007.

3.2.3.2. Mapas finales/resultado

Del mismo modo que en el punto superior todos los mapas finales fueron realizados a través del programa SIG *ArcGIS*® v.9.3. y se utilizó la misma base de datos. Los procesos por los que se llegó a la obtención de estos mapas se detallan en el apartado 5 "El modelo numérico del proceso de erosión" de la presente tesis.

3.2.3.3. Creación del Modelo digital de Elevación (MDE o DEM por sus siglas en inglés)

Para la creación del modelo digital de elevación (DEM) con ArcGIS® v.9.3, los raster utilizados se obtuvieron del catálogo de imágenes del satélite SPOT 5, seleccionando una de tamaño de celda 5x5 metros de 4 bandas y los *shapes* de INEGI de la sección cartas topográficas en referencia a las curvas de nivel. El procedimiento se detalla a continuación:

El sistema de información geográfica ArcGIS, tiene dos vías o programas para calcular un DEM con la misma metodología. Dentro de ArcGIS, el programa ArcMap es la versión para el sistema Windows® y ArcInfo, los es para DOS®. El método Topogrid (ArcInfo) es un método de interpolación específicamente diseñado para la creación de DEMs, corregidos hidrológicamente, a partir de coberturas (*coverages*) con información de altitud, con el método TopoToRaster en ArcMap, se acepta la información vectorial, en formato *shape*, a diferencia de ArcInfo, donde esta información debe ser transformada a *cobertura* o *coverage*. Este último, el método a través de ArcMap, es que se usó en el presente trabajo para la creación del DEM.

1. El primer paso es abrir la capa vectorial, en forma de puntos o de curvas de nivel:
 - *File Add data...* → Seleccionar y abrir capa vectorial de curvas de nivel
2. Lo siguiente para la creación del DEM es abrir el módulo correspondiente dentro de las extensiones de *Arctoolbox*:
 - *Arctoolbox 3D* → *Analyst tools* → *Raster interpolation* → *TopoToRaster*
3. Los parámetros obligatorios de *TopoToRaster* son:
 - *INPUT FEATURE DATA*: Aquí se ingresa la información vectorial necesaria para el cálculo del DEM, en forma curvas de nivel. En esta parte se pueden agregar también, si las hubiera, capas de cauces, depresiones (*sinks*), así como, capa de lagos. Se debe tener la precaución de indicar en *File*, el nombre de la columna que contiene la información requerida, por ejemplo, la que indica los valores de altitud y por otra parte, en *Type*, de qué tipo de capa se trata. Las opciones son:
 - *POINTELEVATION*: Cuando la información de altitud está formato de puntos.
 - *CONTOUR*: Cuando la información de altitud está forma de curvas de nivel digitalizadas.
 - *STREAM*: Cuando la información representa la ubicación de los cauces.
 - *SINK*: Corresponde a la capa, en forma de puntos, conteniendo depresiones conocidas.
 - *BOUNDARY*: Es una capa que contiene un simple polígono que representa el límite exterior de nuestro DEM final
 - *LAKE*: Capa de polígonos que contiene la información de la ubicación de lagos
 - *OUT SURFACE RASTER*: Nombre y ubicación del DEM final
4. Los parámetros opcionales de *TopoToRaster* que a continuación se detallan son los que pueden influir en la precisión del DEM final:
 - *OUTPUT CELL SIZE*: aquí se selecciona el tamaño de celda o resolución de nuestro DEM final.
 - *DRAINAGE ENFORCEMENT*: debe dejarse seleccionado la opción *ENFORCE*, ya que de esta manera se removerán todas las depresiones generadas por errores de interpolación. Si se cuenta con una capa de *sinks*, se debe seleccionar *ENFORCE_WITH_SINK*
 - *PRIMARY TYPE INPUT DATA*: Aquí se debe seleccionar el formato de la información vectorial para la construcción del DEM. Si son puntos, *SPOT*, o si son curvas de nivel, *CONTOUR*.
 - *MAXIMUM NUMBER OF ITERATIONS*: Indica la intensidad en la eliminación de depresiones o *sinks*. Siempre son valores mayores a 0 y rara vez supera el valor de 45. Un valor recomendable y adaptable tanto a puntos como curvas de nivel es 35
 - *TOLERANCE 1*: Esto representa la precisión y densidad de los puntos de elevación. Si se utilizan curvas de nivel, el valor de *TOLERANCE*, debe ser fijado en la mitad de la equidistancia.

El resto de parámetros que aquí no se mencionan, es correcto dejarlos en su valor por defecto. Para más información se puede recurrir a los manuales de ayuda de ArcGIS (ESRI, 2009)

3.3. Trabajo de Campo

El trabajo de campo se llevó a cabo en dos etapas separadas estacionalmente, es decir se realizaron salidas a campo en temporalidad otoño-invierno donde se cubrieron las subáreas_01 de cada área de estudio y otras salidas en primavera verano donde se cubrieron las subáreas_02 de cada área de estudio.

Las visitas previas de reconocimiento y evaluación se realizaron en septiembre de 2014, y tras la evaluación positiva de las diferentes áreas, se procedió a la preparación de las salidas a campo para la recogida de muestras y toma de medidas de parámetros físicos relevantes del lote otoño-invierno, que se desarrollaron entre octubre de 2014 y enero de 2015. El total de muestras recopiladas en este período fue de 16; 5 para el subárea MC_01, 5 para el subárea TP_01 y 6 para el subárea TSA_01 que incluían tanto muestras tomadas del perfil del suelo erosionado como de elementos superficiales o la capa que subyace a dichos suelos conocida como Tepetate o *hardpan*.

Durante el lote primavera-verano desarrollado entre marzo y junio de 2015, se recuperaron 12 muestras, 4 para el subárea MC_02, 3 para el subárea TP_02 y 4 para el subárea TSA_02 y una que pertenecía al Tepetate de la subárea MC_01.

El criterio para la recogida de muestras se realizó en base a la variabilidad espacial y vertical. El criterio de la variabilidad espacial pretendió seguir los lineamientos seguidos para la elección de las áreas de estudio buscando de alguna forma la heterogeneidad de substratos, dentro de cada área, eligiendo los puntos de muestreo al azar, siguiendo el curso de las cárcavas presentes en las áreas de estudio. El criterio para la verticalidad (Figura 23) supuso una zonificación vertical de los muestreos y se justifica en la presunción de una diferente capacidad de infiltración observada en campo entre la costra, la subcostra, el área correspondiente al perfil medio del suelo y un horizonte diferenciado, digamos "*arcilloso*", formado antes del tepetate o "*hardpan*" que hace de base para estos suelos, por lo que se presuponen diferencias significativas en cuanto a otras propiedades como el pH, la conductividad eléctrica, la presencia de cationes intercambiables, la capacidad de intercambio catiónico, etc., lo que implica o advierte una diferencia en los valores de los coeficientes de cálculo como la erosividad, la erodibilidad, etc.

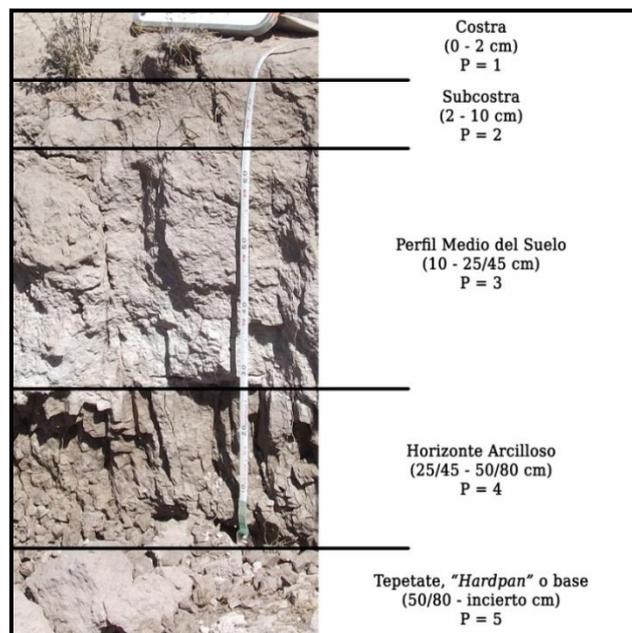


Figura 23. Perfil de suelo y criterio de zonificación vertical.
Fuente: Elaboración propia

En la zonificación vertical del muestreo entenderemos como costra los 2 primeros centímetros superficiales (0 - 2 cm), como subcostra el rango comprendido entre (2 - 10 cm), como perfil medio del suelo será desde la subcostra hasta el horizonte arcilloso cuyo límite suele hallarse entre los 25 -35 cm, por tanto (10 - 25/35 cm), el horizonte arcilloso es un área de cambio bien definida que alcanza unas profundidades entre el rango de (25/35 - 50/80 cm).

Fue este el criterio que se siguió para recoger las muestras en campo, pero para hacer más sencilla la

graficación de los valores de los resultados obtenidos, se diseñó un sistema de clasificación acorde a los objetivos del proyecto, por lo que se les otorgo un número relacionado a su profundidad desde el más superficial hasta el más profundo y una letra por si el punto de muestreo difería dentro de la misma subárea, de modo que por ejemplo, una de las leyendas de muestras quedó MC_01_A3, lo que nos indica el área MC (Mesa de Conejos), la subárea 01, el punto de muestreo A y la profundidad relativa a la superficie correspondiente al perfil medio del suelo (10 - 25/35 cm).

3.3.1. Exposición de los datos recogidos en campo

El total de muestras recogidas se presenta en la siguiente Tabla 12.

Tabla 12. Relación de muestras por subárea, ubicación geográfica y descripción de las mismas. En el trabajo de campo consistió de 15 puntos muestreados en las 3 áreas de estudio, 6 perfiles de suelo analizados, 28 muestras tomadas. Fuente: Elaboración propia. El Datum usado para las coordenadas es el WGS-84_UTM_zona 14N

SUB ÁREA ESTUDIO	NOMBRE MUESTRA	X (UTM)	Y (UTM)	DESCRIPCIÓN	SUB ÁREA ESTUDIO	NOMBRE MUESTRA	X (UTM)	Y (UTM)	DESCRIPCIÓN
SCp1 MESA DE CONEJOS_01	MC_01_A1	287266	2445703	Costra superficial entre 0-2 cm de profundidad	SCp4 MESA DE CONEJOS_02	MC_02_A1	288168	2444916	Costra superficial entre 0-2 cm de profundidad
	MC_01_A2			0 - 10 cm de profundidad		MC_02_A2			0 - 10 cm de profundidad
	MC_01_A3			10 - 45 cm profundidad		MC_02_A3			10 - 45 cm profundidad
	MC_01_B4	287312	2445718	horizonte "arcilloso" de unos 30 cm. de espesor sobre el lecho de la cárcava	MC_02_B4	288153	2444913	horizonte "arcilloso" de unos 30 cm. de espesor sobre el lecho de la cárcava	
	MC_01_C+1	287465	2445687	Banco de arena, zona cola de la cárcava	MC_01_B5	287315	2445721	Tepetate subárea MC_01	
SCp2 TEPETATE LA PURISIMA_01	TP_01_A1	276410	2444615	Costra superficial entre 0-2 cm de profundidad	SCp6 TEPETATE LA PURISIMA_02	TP_02_A1	275816	2443962	Costra superficial entre 0-2 cm de profundidad
	TP_01_A2			0 - 10 cm de profundidad		TP_02_A3			10 - 45 cm profundidad
	TP_01_B6	276381	2444769	Depósito de arena aluvial bajo tepetate		TP_02_A4			horizonte "arcilloso" de unos 30 cm. de espesor sobre el lecho de la cárcava
	TP_01_C2	276245	2444903	0 - 10 cm de profundidad					
	TP_01_D4	276221	2444895	horizonte "arcilloso" de unos 30 cm. de espesor sobre el lecho de la cárcava					
SCp3 TEPETATE SAN ANTONIO_01	TSA_01_A1	277634	2443425	Costra superficial entre 0-2 cm de profundidad	SCp5 TEPETATE SAN ANTONIO_02	TSA_02_A1	278115	2443012	Costra superficial entre 0-2 cm de profundidad
	TSA_01_A3			10 - 45 cm profundidad		TSA_02_A2			0 - 10 cm de profundidad
	TSA_01_B1	277565	2443451	Costra superficial entre 0-2 cm de profundidad		TSA_02_A3			10 - 45 cm profundidad
	TSA_01_B3			10 - 45 cm profundidad		TSA_02_A4			horizonte "arcilloso" de unos 30 cm. de espesor sobre el lecho de la cárcava
	TSA_01_B4			horizonte "arcilloso" de unos 30 cm. de espesor sobre el lecho de la cárcava					
	TSA_01_C5	277342	2443392	Tepetate o Hardpan					

3.3.2. Principales parámetros físicos relacionados con la erosión

3.3.2.1. Capacidad de infiltración

Se denomina capacidad de infiltración a la velocidad máxima con que el agua penetra en el suelo. La capacidad de infiltración depende de muchos factores, es decir un suelo desagregado y permeable, tipo arenoso, tendrá una capacidad de infiltración mayor que un suelo arcilloso y compacto. También si una gran parte de los poros del suelo ya se encuentran saturados, la capacidad de infiltración será menor que si la humedad del suelo es relativamente baja, o si se da el caso de que los poros del suelo de los horizontes superiores ya se encuentran saturados, la infiltración se hará en función de la permeabilidad de los horizontes inferiores. Por otro lado una precipitación intensa podrá provocar la colmatación de los poros superficiales, con partículas finas del suelo, reduciendo de este modo la infiltración.

Para este estudio en concreto se usaron los datos de permeabilidad e infiltración generados en el estudio de Puente-Castillo (2014), en el propio Instituto de Geología de la UASLP. En su estudio la compañera encontró los resultados resumidos en la Tabla 13, para suelos y rocas del área Mesa de los Conejos y Escalerrillas, la cual que se solapa con el proyecto propio.

Tabla 13. Capacidad de infiltración. Fuente: Modificado de Puente-Castillo (2014)

Nº de prueba	Capacidad de infiltración (mm/h)	Promedio suelos (mm/h)
1	2.1	3.34
2	3.6	
3	4.6	
7	3.8	
8	2.6	
Pruebas de rocas		Promedio rocas (mm/h)
4	0.17	0.41
4'	0.6	
5	0.47	

De este modo y con la consideración de que los suelos presentes en las diferentes áreas de estudio poseían un perfil muy similar y características análogas se optó por usar el promedio de los valores para los suelos de esa zona, como valor estándar de capacidad de infiltración para todas las áreas de estudio, e igualmente se realizó para las rocas o afloramientos de esas áreas.

3.3.2.2. Rugosidad, contenido en fragmentos rocosos (R%)

La rugosidad entendida para este estudio se podría definir como el contenido de fragmentos rocosos a nivel superficial con dos categorías, los fragmentos sobre la superficie del suelo y aquellos que están parcialmente embebidos en la superficie del suelo. Para determinar la primera categoría se utilizaron las observaciones directas de campo y las fotografías realizadas durante las salidas a campo. Para determinar las parcialmente embebidas se usó la granulometría de la fracción gruesa de las capas superficiales de los diferentes perfiles de suelos presentes en las áreas de estudio, ya que al muestrear, como ya se ha nombrado anteriormente, la profundidad de muestreo 1, o costra superficial, sólo ocupaba los dos primeros centímetros de la superficie del suelo, aunque se ponderó con un coeficiente por los fragmentos de grandes dimensiones embebidos en la superficie que, evidente, no estaban representados en los análisis granulométricos.

3.3.2.3. Resistencia al corte superficial

El ensayo scisométrico o de molinete (*Vane Test o Field Vane Test*) es un ensayo *in situ* utilizado para la determinación de la resistencia al corte sin drenar en suelos cohesivos saturados. La resistencia al corte superficial a saturación, se realizó a través de un medidor de campo de la marca *Control* modelo 16-T0175/A para su uso en campo y laboratorio, que disponía de 3 adaptadores, el estándar de 25 mm de diámetro, con un rango entre 0-10 N/cm² (0-100 kPa), el adaptador grande para medidas de alta sensibilidad, con un rango entre 0-2 N/cm², y el adaptador pequeño de alta capacidad para rangos entre 0-25 N/cm².

El procedimiento para la realización de esta prueba es sencillo, consiste en hincar en el terreno un "molinete" constituido por cuatro placas de acero ortogonales solidarias a un varillaje, se satura con agua la superficie que va a ser analizada y se hunde el medidor hasta que las patitas del adaptador queden completamente enterradas y se mide el par de torsión T al girar el dispositivo hasta la ruptura del terreno, quedando registrado en la parte superior del medidor. Calcular la fuerza de resistencia al corte superficial, τ (en kPa), a partir de la ecuación:

$$\tau = M / K \tag{4}$$

en donde

M es el par de cizalla del suelo (en N/cm, el valor que obtenemos del medidor)

K es una constante que depende de las dimensiones y forma de la paleta.

Suponiendo que la distribución de la resistencia al cizallamiento es uniforme a través de los extremos y alrededor de la superficie curvada de un cilindro, entonces:

$$K = \pi D^2 H / 2 \times (1 + D/3H) \times 10^{-6} \tag{5}$$

en donde

D es el ancho total del adaptador medido a precisión 0.1 mm.

H es la altura del adaptador medido a precisión 0.1 mm.

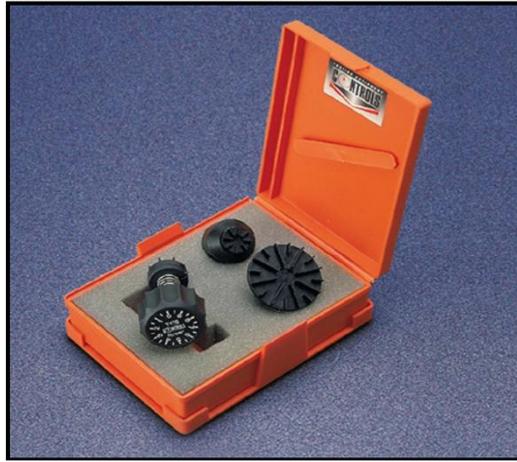


Figura 24. Imagen del medidor de campo para la resistencia al corte superficial

3.3.2.4. Porcentaje de cobertura de la vegetación

El porcentaje de cobertura de la vegetación fue desarrollado a través del programa SIG *ArcGIS*® v.9.3. realizando una clasificación supervisada de las imágenes actuales de las áreas de estudio obtenidas por medio del programa *Google Earth*®, siendo calculado no como porcentaje sino como capa raster georreferenciada y multiplicable a las demás capas consideradas en el modelo desarrollado. Evidentemente al realizar dicha clasificación supervisada si se tuvo en cuenta las observaciones percibidas y las fotografías tomadas en las salidas a campo.

3.4. Trabajo de Laboratorio: Análisis fundamentales.

El trabajo de laboratorio se realizó en su mayor parte en las dependencias del Instituto de Metalurgia de la UASLP, en Laboratorio de Geomicrobiología dependiente de la Dra. J. Viridiana García Meza, coasesora de esta tesis, con la colaboración de diferentes laboratorios del propio Instituto de Metalurgia que prestaron apoyo con determinados equipos necesarios para los análisis de DRX, Absorción Atómica y Porcentaje de Materia Orgánica, a excepción del análisis de Cationes Intercambiables, cuya determinación final se realizó en el Laboratorio de Geoquímica del Instituto de Geología de la UASLP y el análisis granulométrico que fue llevado a cabo entre el Laboratorio de Geomecánica Aplicada y el Laboratorio de Sedimentología del Instituto de Geología de la UASLP.

3.4.1. Resumen y justificación de los análisis fundamentales realizados

Los análisis que se consideraron fundamentales e indispensables para garantizar la mayor calidad técnica y científica del estudio de erosión propuesto y el objetivo final de realizar un modelo del proceso fueron determinados tanto teórica como empíricamente, debido al tipo de suelo, la variabilidad de su perfil y la estructura observada *in situ*, el clima preponderante y el contexto social en el área de estudio, ya que "las decisiones deben hacerse en un nivel adecuado de complejidad o simplicidad en función del objetivo" (Morgan, 2005), por lo que es el investigador el que debe determinar cuáles son los análisis necesarios para poder expresar el conocimiento en forma de resultados, en base a la complejidad objetivo y no sólo basándose en el *background* teórico existente, sino también a través del conocimiento local, empírico, de aquellos parámetros que puede observar, necesarios para plasmar esa realidad que intenta "*modelizar*".

3.4.2. Descripción de los análisis realizados

3.4.2.1. Preparación de la muestra

a. Principio y alcance

El objetivo de la preparación es homogeneizar la muestra de suelo para ser usada en los análisis químicos y físicos. Estos análisis generalmente se realizan en la fracción fina de suelo (<2 mm), la cual se ha secado a una temperatura no superior a $40^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, hasta masa constante, constituyendo lo que se denomina "suelo seco al aire". Las ventajas de usar el suelo seco al aire consisten en que generalmente posee un contenido de humedad óptimo para manipularlo y procesarlo, la masa de suelo seco al aire permanece relativamente constante y la actividad microbiana es baja durante el almacenaje.

- Nota 1. El secado de la muestra en una estufa a $40^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ es preferible al secado a temperatura ambiente porque el aumento en la velocidad de secado limita los cambios debidos a la actividad microbiana.
- a.1. Este procedimiento es aplicable a todos los tipos de suelos.
- b. Equipos y materiales especiales**
- b.1. Martillo de madera o de otra superficie suave, o tapón de goma.
 - b.2. Bandejas.
 - b.3. Estufa con circulación de aire capaz de mantener una temperatura de $40^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ (no indispensable).
 - b.4. Tamiz de acero inoxidable o de otro material inerte, con orificios de 2 mm.
 - b.5. Mortero y pistilo de porcelana.
 - b.6. Bolsas o frascos de plástico con tapa para almacenar las muestras.
 - b.7. Mortero y pistilo de ágata.
 - b.8. Tamiz de acero inoxidable o de otro material inerte, de orificios de 0.5 mm o de otro tamaño especificado en el método de análisis.
- c. Procedimiento**
- c.1. Homogeneizar bien la muestra de terreno, disgregando los terrones manualmente o mediante presión con un martillo de madera o un tapón de goma, eliminando las piedras y los residuos vegetales de mayor tamaño tales como raíces gruesas.
 - Nota 2. En el caso de suelos arcillosos, secar previamente la muestra hasta alcanzar un grado de humedad que permita una fácil desintegración de los terrones.
 - c.2. Separar una fracción de al menos 500 g de la muestra de terreno (en adelante muestra de laboratorio o simplemente muestra de suelo), esparcirla sobre una bandeja. El espesor de la capa de muestra no debe ser superior a 15 mm.
 - c.3. Secar la muestra al aire, dejando la bandeja en un ambiente ventilado libre de contaminación, o bien en estufa a una temperatura no superior a $40^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, hasta que la pérdida de masa no sea mayor del 5% en 24 horas.
 - c.4. Tamizar la muestra a través del tamiz de 2 mm. Los terrones que no pasan por el tamiz se disgregan (no se muelen) en un mortero y se tamizan nuevamente. Los fragmentos orgánicos y grava que permanecen en el tamiz se eliminan, a menos que se requiera conocer el porcentaje de grava.
 - c.5. La muestra de fracción < 2 mm se homogeniza y se almacena en una bolsa o frasco plástico y constituye la muestra de suelo seco al aire que se somete a los procedimientos analíticos usuales. El remanente de la muestra de terreno se almacena en una bolsa plástica y permanece como contramuestra.
 - Nota 3. Si la cantidad de muestra es excesiva para almacenarla, obtener una submuestra mediante el sistema de cuarteo. Para ello, esparcir la muestra formando una capa delgada, dividirla en cuatro porciones iguales, combinar dos de las cuatro porciones diagonales, descartando las otras dos. Repetir este procedimiento hasta obtener la cantidad deseada de muestra de suelo.

3.4.2.2. Análisis granulométrico de suelos

El suelo es un medio muy heterogéneo constituido por infinidad de partículas, las cuales poseen una variedad en tamaño que podríamos catalogar de ilimitada. Es precisamente esta proporción de cada elemento del suelo lo que se llama la textura, o dicho de otra manera, la textura representa el porcentaje en que se encuentran los elementos que constituyen el suelo.

Cuando se comenzaron las investigaciones sobre las propiedades de los suelos se creyó que sus propiedades mecánicas dependían directamente de esta distribución en tamaños. Aunque hoy sabemos que es muy difícil deducir con certeza las propiedades mecánicas de los suelos a partir de su distribución granulométrica, sin embargo si se considera un dato relevante que permite inferir información cualitativa y cuantitativa, sobre otras propiedades físicas importantes, muchas de las cuales, nos proporcionarán información muy valiosa sobre el manejo del suelo y el agua, tales como la Humedad a Capacidad de campo (CC), la Humedad equivalente, el Punto de saturación (Ps), el Punto de marchitez permanente (PMP) y la Densidad aparente (Da), (Lugo-

López, 1953; Ojeda, 1963; Baver, 1966; Valdivia y Pina, 1980; citados en León-Arteta, 2001) o bien en la estimación de curvas de retención de humedad (Palacios y Jaspeado, 1980; citado en León-Arteta, 2001), la consistencia, la capacidad de infiltración, etc. e incluso de las propiedades químicas como la Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC).

Cuanto menos esta clase de estudios nos ayudan en el estudio de la morfología, la génesis y la clasificación de los suelos, (Buol *et al.*, 1973), como por ejemplo el hecho de que un horizonte de suelo deba mostrar una diferencia mínima de un 3% de arcilla con el horizonte inmediato superior (USDA SSS., 1998, ISSS-ISRIC-FAO, 1994), además nos ayudan a tener una idea de su comportamiento y respuesta en ámbitos de usos aplicados como son la ingeniería, la agronomía, la geología y la geotecnia.

El análisis granulométrico y textural tiene por objeto la determinación cuantitativa de la distribución de tamaños de partículas de suelo. La escala clasificada para ello, fue propuesta por Blair y McPherson (1999; citado en Sarocchi, 2006) para depósitos sedimentarios y se puede apreciar en la Tabla 14.

Tabla 14. Escala granulométrica utilizada en sedimentología propuesta por Blair y McPherson (1999). Fuente: Modificada en Sarocchi (2006).

DEPÓSITOS SEDIMENTARIOS		
Tamaño	ϕ Phi	Blair y McPherson (1999)
32.8 m	-15	Muy grueso
16.4	-14	Grueso
8.2	-13	Mediano
4.1	-12	Fino
2	-11	Muy grueso
1	-10	Grueso
0.5 m	-9	Mediano
256 mm	-8	Fino
128	-7	Grueso
64	-6	Fino
32	-5	Muy grueso
16	-4	Grueso
8	-3	Mediano
4	-2	Fino
2	-1	
1	0	Muy grueso
0.5 mm	1	Grueso
250 μ m	2	Mediano
125	3	Fino
63	4	Muy fino
31	5	Grueso
16	6	Mediano
8	7	fino
4	8	Muy fino
2	9	
1	10	
0.5	11	
0.2	12	
0.1 μ m	13	

La distribución por tamaño de las partículas (granulométrica) de un suelo, es el porcentaje de materia mineral en peso de cada fracción, obtenida por separación de las partículas minerales en dos o más clases por tamaño mutuamente excluyentes.

Para el análisis granulométrico que se llevará a cabo en este estudio se considerarán las partículas en cuatro rangos de tamaños que van desde -4 ϕ (Phi) hasta 13 ϕ (Phi).

- a. **Grava:** Constituida por partículas cuyo tamaño es mayor que 4 mm.
- b. **Arena:** Constituida por partículas menores de 4 mm y mayores que 0.063 mm (63 μ m).
- c. **Limo:** Constituido por partículas menores que 31 μ m y mayores que 2 μ m.
- d. **Arcilla:** Constituida por partículas menores que 2 μ m.

El análisis granulométrico puede expresarse de dos formas, analítica o gráfica.

- i. **Analítica.** Mediante tablas que muestran el tamaño de la partícula contra el porcentaje de suelo menor de ese tamaño (porcentaje respecto al peso total).
- ii. **Gráfica.** Mediante la función de una curva denominada *curva granulométrica*, dibujada a partir de puntos en cuyo eje de abscisas, en escala logarítmica, se grafica el tamaño del grano y en cuyo eje de ordenadas, en escala natural, se grafica el porcentaje del suelo menor que ese tamaño (porcentaje respecto al peso total).

En el análisis granulométrico son de uso común varios métodos (en seco y en solución) para determinar el tamaño de los granos de los suelos:

- Método Mecánico, o del tamizado (ASTM D-422-63, UNE 103 101, ambas granulometría de suelos por tamizado), se usa normalmente para la fracción de partículas gruesas de un suelo.
- Método de la pipeta, (Buol *et al.*, 1973), descrito por Smith (1981) y Gee y Bauder (1986), fracción de finos.
- Método del Hidrómetro de Bouyoucos (Bouyoucos, 1962), fracción de finos.

La elección del método a seguir depende de los objetivos particulares del investigador. Normalmente se combina el método del tamizado con alguno de los métodos en húmedo, siendo el de Bouyoucos el más rápido y el de la pipeta al que se le atribuye mayor precisión, aunque algunos investigadores Day (1965), Gee y Bauder (1986) destacan que para determinados tipos de suelo la diferencia entre ambos es mínima. En la metodología seleccionada para esta tesis se optó por el método del tamizado combinado con el de Bouyoucos, con las modificaciones hechas según la norma ASTM D-422-63 para los cálculos ya que se utilizó, para tomar las lecturas de densidad, un hidrómetro tipo 152H-62 descrito en dicha norma.

3.4.2.2.1. Método Mecánico o del Tamizado: Fracción gruesa

Este análisis como su nombre lo indica, consiste en hacer pasar una muestra de suelo seco, de peso conocido y determinado, por un arreglo de tamices organizados en orden decreciente de tamaño de abertura, de tal forma que van quedando retenidos en cada uno, las partículas con un diámetro menor a la abertura del tamiz anterior y mayor a la luz del tamiz en el que están retenidas.

De esta forma es posible determinar el porcentaje de masa de cada uno de los tamaños de grano, relacionando cada reserva con el peso total de la muestra.

a. Materiales

- a.1. Báscula con sensibilidad de 0.01 g
- a.2. Set de tamices de 4 ϕ a -4ϕ
- a.3. Cepillo y brocha
- a.4. Cartulina o base sobre la que se depositarán los remanentes de los tamices
- a.5. Envases adecuados para el manejo y recolección de los remanentes
- a.6. Máquina de ensayo de agitación automática (ro-tap)
- a.7. Mazo de goma o similar
- a.8. Recipiente sobre el que realizar la desagregación de los terrones o agregados.

b. Procedimiento

- b.1. Secar la muestra al aire según lo especificado en la metodología de análisis de esta tesis (1.1 preparación de la muestra), con la finalidad de que los granos que se encuentran unidos por capilaridad se separen completamente y lleguen al tamaño del tamiz que les corresponde, puede ocurrir (este es nuestro caso) que la compactación de los agregados sea tal que sea necesario usar un mazo de goma u otro utensilio de goma capaz de producir la rotura de los terrones sin dañar el tamaño de las rocas y gravas.
- b.2. Pesarse el total de la muestra (W_m), una vez completamente desagregada, y anotar en la base de datos.
- b.3. Preparar los tamices, pesar cada uno y anotarlos (W_t) para su posterior cálculo.
- b.4. Acomodar los tamices en tamaño decreciente, es decir de -4ϕ a $>4 \phi$.
- b.5. Vaciar la muestra sobre los tamices y cribarlos por 1 - 2 minutos manualmente, ya que no caben en el agitador automático (ro-tap).

- b.6. Preparar y etiquetar las bolsas con el tamaño de cada malla, pesarlas y anotar en la base de datos.
- b.7. Preparar una cartulina sobre la que se vaciará el material de cada tamiz.
- b.8. Tomar el primer tamiz, el de diámetro mayor (-4 φ) y cribarlo a mano sobre la cartulina, sin pasar los bordes de ésta, hasta que ya no caiga material del mismo.
- b.9. El material que pasó por el tamiz al haber sido cribado a mano, devolverlo a la torre de tamices desde el de mayor tamaño.
- b.10. Pesar el tamiz con el material retenido en él (W_{tm}), después vaciarlo en la cartulina para así poder introducirlo en la bolsa de muestreo, con la etiqueta correspondiente a esa malla.
- b.11. Limpiar el tamiz ocupado sobre la torre de tamices con una brocha, para tratar de recuperar tanto material como se pueda.
- b.12. Pesar la bolsa de muestreo con el material (W_{bm}) y anotar el dato obtenido en la base de datos (así se podrá ejercer un segundo de control).
- b.13. Tras cribar a mano el tamiz N^o. -3 φ, acomodar la torre de tamices en el ro-tap (pues ya caben), por 5 - 10 minutos para que cribe los tamices y los granos lleguen al tamaño de la malla que les corresponde.

Nota 1. Como la cantidad que traspasaba el tamiz al cribarlo a mano era demasiado grande se decidió aumentar el tiempo de cribado automático a 10 - 12 minutos, así se consiguió reducir el tiempo de este cribado manual al mínimo.

- b.14. Para cada tamiz, se seguirán los pasos 4 al 12, hasta que la muestra se termine. Por cada muestra se seguirán los pasos 1 al 13.

c. Cálculos

- c.1. Total de muestra

$$W_m = W_{tm} - W_{bg} \quad (6)$$

- Donde:

- W_m = Peso total neto de la muestra
- W_{tm} = Peso total bruto de la muestra
- W_{bg} = Peso de la bolsa que contiene la muestra bruta

- c.2. Peso retenido en cada tamiz

$$W_{f_x} = W_{ta} - W_t \quad (7)$$

- Donde:

- W_{f_x} = Peso neto correspondiente al remanente de cada tamiz
- W_{ta} = Peso total bruto del tamiz más el remanente
- W_t = Peso neto del tamiz

- c.3. Peso neto de cálculo

$$W_{n_f} = W_{f_1} + W_{f_2} + \dots + W_{f_x} \quad (8)$$

- Donde:

- W_{n_f} = Peso neto de cálculo. Sumatorio de los pesos netos correspondientes a los remanentes de cada tamiz
- $W_{f_1}; W_{f_2} \dots W_{f_x}$ = Parciales netos de los remanentes de cada tamiz

- c.4. Pérdida total

$$P_t = W_m - W_{n_f} \quad (9)$$

- Donde:

- P_t = Pérdida total durante el desarrollo del análisis, en gramos
- W_m = Peso total neto de la muestra
- W_{n_f} = Peso neto de cálculo

- c.5. Porcentaje de pérdida

$$P_p = (P_t \times 100) / W_m \quad (10)$$

- Donde:

- P_p = Porcentaje de pérdida
- P_t = Pérdida total durante el desarrollo del análisis, en gramos
- W_m = Peso total neto de la muestra

- c.6. Porcentaje de la fracción remanente o retenida

$$P_{f_r} = (W_{f_x} * 100) / W_{n_f} \quad (11)$$

- Donde:
 - Pfr = Porcentaje para cada fracción remanente o retenida en cada tamiz
 - Wfx = Peso neto correspondiente al remanente de cada tamiz
 - Wnf = Peso neto de cálculo

c.7. Porcentaje acumulado

$$P_{Afr} = P_{fri} + P_{fr_{x>i}} \quad (12)$$

- Donde:
 - PAfr = Porcentaje acumulado de cada fracción remanente o retenida
 - Pfri = Porcentaje para cada fracción remanente de cada tamiz
 - Pfr_{x>i} = Sumatorio de los porcentajes de las fracciones remanentes de los tamices superiores al tamiz actual

c.8. Acumulado de material pasante

$$\%A_{pas} = 100 - P_{Afr} \quad (13)$$

- Donde:
 - %A_{pas} = Porcentaje acumulado del material que logra pasar de un tamiz a otro
 - PAfr = Porcentaje acumulado de cada fracción remanente o retenida

- Nota: este valor será el usado para construir la curva granulométrica ya sea en hoja semilogarítmica o formato digital (hoja excel)

d. Creación de la curva granulométrica en hoja excel

Para la creación de la curva se seguirán los siguientes pasos:

d.1. Abriendo el programa de Excel, sobre la barra de menú principal se selecciona insertar y se escoge gráfico tipo dispersión XY.

d.2. Una vez seleccionado el gráfico, justo por encima de la barra de menú principal aparece la leyenda "Herramientas de gráfico" y bajo ésta, tres opciones, seleccionamos la opción de "Diseño", y aparecen las opciones correspondientes a esa pestaña, donde deberemos seleccionar sobre la caja nombrada "Datos" el botón correspondiente a "Selección de datos". De este modo podemos apreciar que aparece un recuadro llamado seleccionar origen de datos y haciendo click sobre la opción "Agregar" aparece otro recuadro llamado "Modificar serie de datos" que contiene tres espacios/opciones llamadas:

Nombre de la serie: En este espacio añadimos el nombre que se le quiera dar al gráfico
 Valores X de la serie: Seleccionamos la opción de búsqueda (*browse*) y escogemos los datos de apertura de la malla, se presiona la tecla entrar (enter ↵).

Valores Y de la serie: Seleccionamos la opción de búsqueda (*browse*) y escoger los datos del porcentaje acumulado del pasante (%A_{pas}), pulsar entrar (enter ↵).

d.3. Una vez seleccionados el nombre y los valores de X - Y, al pulsar sobre la opción aceptar aparece el gráfico con la curva que estamos dibujando.

d.4. Para dar el formato logarítmico a la gráfica, se selecciona el eje X, se pulsa el botón derecho en el ratón (mouse) y aparece un cuadro de diálogo donde debemos escoger la opción "Dar formato al eje". Esto conlleva que aparezca un nuevo recuadro con varias opciones en el que aparece por defecto seleccionada la selección "Opciones del eje" y dentro del recuadro de posibilidades de modificación encontramos la opción "Mínima" donde debemos seleccionar "Fija" y adjudicarle el valor en el recuadro justo a su lado de "0.001". Igualmente en la opción "Máxima" seleccionamos "Fija" y le asignamos el valor de "100".

A continuación encontramos unos pequeños recuadros de selección que aparecen por debajo de esta área y seleccionamos la opción "escala logarítmica" asegurándonos que este fijada en base a 10. Después en el recuadro de opciones de la izquierda de ese mismo cuadro de diálogo encontramos la opción "número" y al seleccionarlo cambia la interfaz de opciones y en "categoría" debemos asegurarnos que esté seleccionado la opción "General", en caso afirmativo, se presiona la tecla entrar (enter ↵).

d.5. Para dar formato al eje Y, seleccionamos el eje, pulsamos el botón derecho del ratón y

en "opciones del eje", en la opción "Mínima" seleccionamos "Fija" y le adjudicamos el valor de 0, en la opción "Máxima" seleccionamos "Fija" y le asignamos el valor de 100. Justo por debajo de éstas aparecen las opciones "Unidad mayor" y "Unidad menor" donde podemos seleccionar los intervalos para las líneas principales y secundarias de nuestra gráfica, en nuestro caso les asignamos los valores de 10 y 2 respectivamente, tras haber seleccionado la opción "Fija" y presionamos la tecla entrar (enter ↵) o el botón de cerrar al final del cuadro de diálogo.

- d.6. Sobre la barra de menú principal bajo la leyenda "Herramientas de gráfico" seleccionando la opción "Presentación" aparece un submenú llamado "Etiquetas" y en su interior los botones de "Título del gráfico", "Rótulos del eje" donde podemos escogemos las posiciones y los formatos que más nos convengan. En nuestro caso seleccionamos la opción "Encima del gráfico" para el título y "Título bajo el eje" y "Título vertical" para los ejes primarios horizontal y vertical respectivamente.
- d.7. Para insertar las líneas de división secundarias en la gráfica, accedemos al menú principal de la página de excel y escogemos en diseños de gráfico la opción del diseño 10. Ya seleccionado y terminado el gráfico, en las opciones de "Título del eje" escribimos el nombre de los dos ejes. Resultando el gráfico de la curva granulométrica (Figura 28).

Se puede acceder a un tutorial en www.youtube.com/watch?v=zE6QqD1GcvE

3.4.2.2.1.1. Observaciones y realización del método

- a. Se siguió el método para cada una de las muestras
- b. El peso total de la muestra fue de ± 1 Kg en todos los casos posibles, menos en una muestra en la que se produjo mayor gasto durante los análisis por lo que se quedó alrededor de 700 g. En la Tabla 15 se muestra la relación de pesos bruto y neto de cálculo de cada muestra, junto con la pérdida que produjo el ensayo en gramos y en porcentaje.
- c. Se realizó una selección por cuarteo para todas las muestras analizadas a fin de no propiciar una selección intencionada y no ejercer decisión alguna sobre el experimento.
- d. A todas las muestras se les practicó una molienda suave con el mazo de goma, ejerciendo solo la presión necesaria para desarmar los agregados, intentando no dañar las pomez y otras partículas rocosas de pequeño tamaño ubicadas en las muestras.

Tabla 15. Relación de pesos bruto y neto de cálculo de cada muestra. Además de los pesos de cálculo se muestran las pérdidas producidas durante el ensayo en gramos y porcentaje

muestra	Wtot	Wnc	Perd	%Perd	muestra	Wtot	Wnc	Perd	%Perd
MC_01_A1	1367.84	1365.59	2.25	0.16449292	MC_02_A1	1105.27	1102.96	2.31	0.20899871
MC_01_A2	1230.57	1229.67	0.9	0.07313684	MC_02_A2	1257.41	1255.53	1.88	0.14951368
MC_01_A3	1316.77	1315.79	0.98	0.07442454	MC_02_A3	1146.28	1145.03	1.25	0.1090484
MC_01_B4	1381.63	1379.36	2.27	0.1556133	MC_02_B4	1147.07	1145.2	1.87	0.16302405
MC_01_C1	1121.89	1121.03	0.86	0.07665636					
TP_01_A1	1212.29	1210.47	1.82	0.15012909	TP_02_A1	1160.23	1157.8	2.43	0.20944123
TP_01_A2	1289.6	1287.57	2.03	0.15741315	TP_02_A3	1084.55	1083.09	1.46	0.13461804
TP_01_B6	1351.97	1349.27	2.7	0.19970857	TP_02_A4	1067.99	1067.29	0.7	0.06554368
TP_01_C2	687.04	686.67	0.37	0.05385422					
TP_01_D4	1380.89	1380.8	0.09	0.00651754					
TSA_01_A1	1445.42	1443.06	2.36	0.16327434	TSA_02_A1	1079.96	1078.24	1.72	0.15926516
TSA_01_A3	1378.06	1375.72	2.34	0.16980393	TSA_02_A2	1092.06	1090.45	1.61	0.1474278
TSA_01_B1	1201.78	1199.72	2.06	0.1714124	TSA_02_A3	1155.55	1153.78	1.77	0.15317381
TSA_01_B3	1331.53	1329.76	1.77	0.13292979	TSA_02_A4	1085.09	1082.54	2.55	0.23500355
TSA_01_B4	1203.27	1201.55	1.72	0.14294381					

- e. Una vez tamizadas todas las muestras se realizaron los cálculos y se graficaron los resultados según lo descrito en el apartado "d.Creación de la curva granulométrica en hoja excel" de este título obteniendo las curvas granulométricas correspondientes

3.4.2.2.2. Método del hidrómetro o de Bouyoucos: Fracción fina

El método del hidrómetro de Bouyoucos es una de las formas más rápidas para analizar el tamaño de las partículas del suelo cuando éstas son de tamaño tan pequeño que no se puede realizar por el método del tamizado. La muestra de suelo se dispersa con un agente defloculante y se mezcla en un cilindro de vidrio alto (probeta de 1000 ml) con agua desionizada (o destilada) para que al tiempo que van asentándose las partículas, la densidad de la suspensión sea medida con el densímetro.

Se fundamenta en el hecho de que una en una suspensión colocada en una probeta de sedimentación, la densidad a una profundidad determinada va disminuyendo a medida que se sedimentan las partículas, ya que éstas sedimentan a velocidades proporcionales a su tamaño, es decir, se sustenta en la ley de Stokes.

Stokes (1850) desarrolló una ecuación que relaciona la velocidad de descenso de una partícula esférica en un fluido con respecto al tamaño de esta, que es:

$$\tilde{V} = \frac{Y_S - Y_W}{18 * \eta} * D^2 \quad (14)$$

donde:

\tilde{V} = Velocidad de descenso de la partícula.

Y_S = Peso unitario de los sólidos del suelo

Y_W = Peso unitario del agua.

η = Viscosidad dinámica del fluido.

D = Diámetro de la partícula con forma esférica.

Esta ley para el método del hidrómetro puede ser descrita como una dependencia lineal entre el diámetro de la partícula D , y el inverso de la raíz cuadrada de la velocidad de caída y así, despejada de la ecuación anterior:

$$D = \sqrt{\frac{18 * \eta * \tilde{V}}{Y_S - Y_W}} \quad (15)$$

Pero como la velocidad en este caso puede ser considerada como:

$$D = \sqrt{\frac{18 * \eta}{Y_S - Y_W}} * \sqrt{\frac{h}{t}} \quad (16)$$

donde:

h = Es la distancia que recorre la partícula al sedimentarse.

t = Es el tiempo que tarda en recorrer esa distancia.

Pero como la gravedad específica del suelo:

$$G_S = \frac{Y_S}{Y_W} \quad (17)$$

Entonces:

$$D = \sqrt{\frac{18 * \eta}{(G_S - 1) * Y_W}} * \sqrt{\frac{h}{t}} \quad (18)$$

Entonces, según convenga:

$$D = \sqrt{\theta} * \sqrt{\frac{h}{t}} \quad \text{ó} \quad D = \sqrt{\theta * \tilde{V}} \quad (19)$$

donde:

θ = parámetro de sedimentación en función de la profundidad de asentamiento del hidrómetro, la viscosidad de la solución y la densidad de partículas y de la solución.

Las partículas se agrupan en tres fracciones principales: arena, limo y arcilla. Según la proporción que exista de estas tres fracciones, el suelo pertenecerá a una determinada clase textural, que se define según el porcentaje en peso de cada una de las fracciones del suelo, y se denominan combinándose los nombres según el suelo adquiera como características dominantes una o más fracciones, sino hay dominancia de una fracción pertenece a la clase franca.

a. Materiales

- a.1. Vaso de precipitado de 250 mL.
- a.2. Probetas de vidrio de 1000 mL.
- a.3. Varilla de agitación
- a.4. Agitador de vidrio
- a.5. Cuencos de cerámica
- a.6. Agua desionizada/destilada
- a.7. Solución Calgón (hexametáfosfato de sodio) (NaPO_3)₆ al 5%
- a.8. Alcohol amílico
- a.9. Peróxido de hidrógeno (H_2O_2) al 30%
- a.10. Probeta de 100 mL.
- a.11. Balanza de precisión de sensibilidad de 0.01 g
- a.12. Batidora con vaso metálico
- a.13. Hidrómetro Bouyoucos, graduado para dar la concentración en g/L a 20 °C (152H-62 ASTM D-422-63)
- a.14. Termómetro
- a.15. Cronómetro o un reloj con segundero
- a.16. Pecera o acuario
- a.17. Termostato de acuario
- a.18. Bomba de circulación de agua de acuario

b. Procedimiento

- b.1. Primero rellenar el acuario de agua hasta una altura conveniente e iniciar el termostato, colocando la temperatura deseada de 20° C, de este modo cuando introduzcamos las probetas del experimento, la temperatura del exterior e interior de las probetas acabará por igualarse, la bomba de circulación ayuda a conseguir la temperatura deseada más rápido.
- b.2. Para preparar la solución dispersante Calgón al 5%, pesar 50 g de hexametáfosfato de sodio en un recipiente y aforar a un litro.
- b.3. Para eliminar la materia orgánica, pesar ± 60 de muestra en un vaso de precipitado de 250 mL y agregar de 10 en 10 mL hasta 40 mL de H_2O_2 al 30%, mezclando perfectamente con un agitador de vidrio después de cada adición, y evaporar hasta la sequedad. A continuación agregar 40 ml. más de H_2O_2 y observar la reacción, evaporar hasta la sequedad, repetir hasta que no haya efervescencia como reacción al H_2O_2 , generalmente dos ataques son suficientes.
- b.4. Talar el cuenco cerámico en la báscula y pesar 50g de muestra seca y sin materia orgánica.
- b.5. Añadir 100 mL de solución Calgón 5% en el propio cuenco y dejar empapar durante 10 minutos.
- b.6. Mientras preparar un blanco en una de las probetas de 1000 mL, mezclando 100 mL de solución Calgón con 880 mL con agua desionizada, así la suma sería 980 mL dejando 20 mL que se supone es el volumen que ocupan 50g de suelo.
- b.7. Transcurrido el tiempo transferir el contenido del cuenco al vaso de la batidora ayudándose con una piseta de agua destilada
- b.8. Rellenar el vaso con agua destilada hasta la mitad de su capacidad y batir durante 5 minutos.
- b.9. Limpiar con la piseta la varilla de la batidora y transferir el contenido del vaso a la probeta de 1000 mL asegurándose de no perder material y limpiándolo bien con la piseta, enrasar a 1000 mL con agua destilada e introducir la probeta en el acuario.
- b.10. Si se producen espumas añadir unas gotas de alcohol amílico (4 - 5)
- b.11. Remover la muestra con la varilla de agitación
- b.12. Contaremos como tiempo 0 ($t=0$) inicio de las mediciones el momento en que se retira la varilla de agitación de la probeta
- b.13. Tomaremos lecturas a: 10", 20", 30", 40", 1', 3', 10', 30', 90', 120' y un tiempo entre 6:52 y 8 h, tanto sobre la muestra como sobre el blanco registrando también las temperaturas en ambos (aunque se espera que ambas estén igualadas a 20°C),

después de cada lectura saque el hidrómetro, enjuague y seque.

Nota. la 2ª edición del Manual de Métodos Estándares (Gee y Bauder, 1986) cita 30 y 60 segundos, 3, 10 y 30 minutos y 1, 1.5, 2 y 24 horas como tiempos de toma de lecturas aunque estos tiempos pueden ser modificados de acuerdo a las necesidades particulares del analista. Para salvar tiempo de laboratorio y hacer más expeditos los análisis, algunos laboratorios llevan a cabo una lectura entre 6 y 8 horas, desechando la de 24 con el fin de hacer más transitable el método. Para el trabajo que ocupa esta tesis en concreto se han seleccionado una serie de lecturas más tempranas a fin de intentar determinar o al menos tener mayor información sobre los rangos correspondientes a las arenas.

c. Cálculos

c.1. Correcciones por menisco, defloculante y temperatura:

~ Corrección del menisco. Los hidrómetros están calibrados para hacer la lectura al nivel libre del líquido. Al formarse el menisco alrededor del vástago, la lectura correcta no puede hacerse, ya que las suspensiones de suelo no son transparentes, por lo que se necesita leer donde termina el menisco y corregir la lectura sumando la altura del menisco

Sumergir el hidrómetro en agua desionizada y hacer dos lecturas en la escala; una en la parte superior del menisco (para que el menisco se forme completo, el cuello debe limpiarse con alcohol para eliminar la grasa) y otra siguiendo la superficie horizontal del agua. La diferencia de las dos lecturas nos da la corrección que debe sumarse a las lecturas hechas al estar operando (C_m).

~ Corrección por defloculante. Se registran dos lecturas del hidrómetro, la primera en una probeta que solo contenga 1 litro de agua desionizada y la segunda lectura en la probeta con el blanco que vamos a preparar para el experimento (100 ml. Calgón más 880 de agua desionizada). La resta entre ambas magnitudes será la corrección por defloculante (C_d)

~ Para la corrección por temperatura (C_t) añadir 0.36 unidades (según NOM 021) a las lecturas de las muestras por cada 1° C por encima de 20° C, y restar 0.36 unidades por cada 1° C por debajo de 20° C.

c.2. Realizar siempre las correcciones necesarias de las lecturas del hidrómetro según la ecuación:

$$R_c = R_i + C_m - C_d \quad (20)$$

donde:

R_c = lectura corregida del hidrómetro sobre la muestra en g/L

R_i = lectura directa del hidrómetro sobre la muestra en g/L

C_m = corrección calculada debido al menisco

C_d = corrección calculada debido al dispersante/defloculante

c.3. Determine la concentración del suelo (C) en suspensión en g/L, con la siguiente expresión:

$$C = R_c - R_L \quad (21)$$

donde:

R_c = lectura corregida del hidrómetro sobre la muestra en g/L

R_L = lectura del hidrómetro de la probeta que se usó como blanco.

R_c y R_L son lecturas tomadas en cada intervalo señalado.

c.4. Si fuera necesario realizar la corrección de la temperatura, se usaría la ecuación:

$$C_{20} = R_c \pm C_t \quad (22)$$

donde:

C_{20} = concentración del suelo en suspensión con la corrección por temperatura

R_c = Lectura corregida del hidrómetro

$\pm C_t$ = corrección calculada debida a la temperatura teniendo en cuenta que si:

• $T_m^a > 20^\circ C = 0.36 * (n^\circ \text{ de } ^\circ C - 20) + T_m^a$

• $T_m^a < 20^\circ C = 0.36 * (20 - n^\circ \text{ de } ^\circ C) - T_m^a$

c.5. Cálculo del tamaño de las partículas ec.19:

$$D = \sqrt{\theta * \tilde{V}} \quad (19)$$

Hay que tener en cuenta las unidades aquí presentes, partiendo de la ecuación 18 del diámetro:

$$D(mm) = D\left(\frac{cm}{10}\right) = \sqrt{\frac{18 * \eta(g * s / cm^2)}{Y_s - Y_w(g / cm^3)}} * \sqrt{\frac{h(cm)}{t(min) * 60}} \quad (18)$$

c.6. Para el cálculo de θ y \check{V}

c.6.1. Determine el valor de θ según la tabla ASTM D422 (Tabla 16) o la ecuación:

$$\theta = \frac{1800 * \eta}{(G_s - 1) * Y_w} \quad (23)$$

donde:

θ = parámetro de sedimentación en función de la profundidad de asentamiento del hidrómetro, la viscosidad de la solución y la densidad de la partícula y la solución.

η = viscosidad dinámica del agua a 20° C (Tabla 17)

G_s = densidad de sólidos (muestra de suelo)

Y_w = peso unitario del agua

Tabla 16. Valores de θ (en ASTM D422 este parámetro es nombrado como K). Fuente: ASTM D422-63(2007)e2, Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2007, www.astm.org

Temperatura ° C	Gravedad específica (Gs)						
	2.5	2.55	2.6	2.65	2.7	2.75	2.8
17	0.0149	0.0146	0.0144	0.0142	0.014	0.0138	0.0136
18	0.0147	0.0144	0.0142	0.014	0.0138	0.0136	0.0134
19	0.0145	0.0143	0.014	0.0138	0.0136	0.0134	0.0132
20	0.0143	0.0141	0.0139	0.0137	0.0134	0.0133	0.0131
21	0.0141	0.0139	0.0137	0.0135	0.0133	0.0131	0.0129
22	0.0140	0.0137	0.0135	0.0133	0.0131	0.0129	0.0128
23	0.0138	0.0136	0.0134	0.0132	0.013	0.0128	0.0126
24	0.0137	0.0134	0.0132	0.013	0.0128	0.0126	0.0125
25	0.0135	0.0133	0.0131	0.0129	0.0127	0.0125	0.0123
26	0.0133	0.0131	0.0129	0.0127	0.0125	0.0124	0.0122
27	0.0132	0.0130	0.0128	0.0126	0.0124	0.0122	0.012
28	0.013	0.0128	0.0126	0.0124	0.0123	0.0121	0.0119
29	0.0129	0.0127	0.0125	0.0123	0.0121	0.012	0.0118
30	0.0128	0.0126	0.0124	0.0122	0.012	0.0118	0.0117

Tabla 17. Densidad (ρ) y viscosidad (η) del agua a temperaturas diferentes (T). Fuente: International Critical Tables of Numerical Data, Physics, Chemistry and Technology, 1926-1930, first electronic edition, 2003. (*exactamente a 3,98 °C, 1cp = 1gcm⁻¹s⁻¹.)

VISCOSIDAD Y DENSIDAD DEL AGUA				
Temperatura (° C)	Densidad (g/cm ³)	Viscosidad dinámica (cpoises)	Viscosidad Cinemática (cstokes)	Temperatura (° F)
0	0.99987	1.7921	1.7923	32.0
2	0.99997	1.6741	1.6741	35.6
4	1.00000	1.5676	1.5676	39.2
6	0.99997	1.4726	1.4726	42.8
8	0.99998	1.3872	1.3874	46.4
10	0.99973	1.3097	1.3101	50.0
12	0.99952	1.2390	1.2396	53.6
14	0.99927	1.1748	1.1756	57.2
16	0.99897	1.1156	1.1168	60.8
18	0.99862	1.0603	1.0618	64.4
20	0.99823	1.0087	1.0105	68.0
22	0.99780	0.9608	0.9629	71.6
24	0.99733	0.9161	0.9186	75.2
26	0.99681	0.8746	0.8774	78.8
28	0.99626	0.8363	0.8394	82.4
30	0.99568	0.8004	0.8039	86.0

- c.6.2. Determine la densidad del suelo muestreado (G_s) o densidad de sólidos según la ecuación:

$$G_s = \frac{W_s}{(W_{Ma}) - (W_{Mas}) + (W_s)} \quad (24)$$

donde:

- G_s = densidad de la muestra
- W_s = Peso del suelo seco
- W_{Ma} = Peso del matraz con agua
- W_{Mas} = Peso del matraz con agua y suelo

- c.6.3. Determine la velocidad \tilde{V} :

Calcular la altura de caída h , usando la ecuación característica del hidrómetro utilizado:

$$h = 15.5 - 0.16(R_L + C_m) \quad (25)$$

donde:

- h = altura de caída
- R_L = lectura directa del hidrómetro sobre la muestra en g/L
- C_m = corrección calculada debido al menisco

La velocidad de caída de las partículas es dada por la relación:

$$\tilde{V} = \frac{h}{60 * t(\text{min})} \quad (26)$$

donde:

- \tilde{V} = Velocidad de descenso de la partícula.
- h = altura de caída
- t = tiempo del intervalo de lectura en minutos

- c.7. Finalmente sustituir θ y \tilde{V} en la ecuación 19 para el cálculo del diámetro

$$D = \sqrt{\theta * \tilde{V}} \quad (19)$$

- c.8. El cálculo del porcentaje en peso de las partículas para cada diámetro calculado responde a la siguiente ecuación según sea el tipo de hidrómetro:

~ Para el hidrómetro tipo 151H:

$$W\% = \frac{G_s * C * 100 * 0.622}{W_{mf}(G_s - 1)} \quad (27)$$

~ para el hidrómetro tipo 152H:

$$W\% = \frac{C * a * 100}{W_{mf}} \quad (28)$$

donde:

- $W\%$ = porcentaje en peso de las partículas para cada diámetro
- G_s = densidad de sólidos (muestra de suelo)
- C = concentración del suelo en suspensión calculada, en g/L = $(R_c - (R_L + C_m - C_d)) - R_L$
- W_{mf} = peso de la muestra fina analizada
- a = corrección por gravedad específica (ASTM D422-63; Tabla 18)

siendo:

$$a = \frac{G_s * 1.65}{(G_s - 1) * 2.65} \quad (29)$$

Tabla 18. Valores del coeficiente de corrección a para distintos pesos específicos de las partículas del suelo ASTM D422-63. Fuente: ASTM D422-63(2007)e2, Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2007, www.astm.org

Peso específico	a	Peso específico	a	Peso específico	a
2.45	1.05	2.60	1.01	2.75	0.98
2.50	1.03	2.65	1.00	2.80	0.97
2.55	1.02	2.70	0.99	2.85	0.96

- c.9. Una vez realizados todos los cálculos construir la tabla de resultados
- c.10. Cuando la tabla de resultados esté completa se procederá a graficar la curva granulométrica sobre papel semilogarítmico o en hoja *excel*.
- d. Creación de la curva granulométrica en hoja *excel*
- d.1. Para la hoja *excel* seguiremos los pasos descritos en el método del tamizado punto 1D. de este mismo apartado Análisis granulométrico.
- d.2. Los cambios son a la hora de seleccionar los valores de los ejes X - Y en el recuadro "Modificar serie de datos", donde deberemos seleccionar la serie de datos del "Diámetro" de nuestra tabla de resultados para el recuadro "Valores X de la serie" y en el recuadro "Valores Y de la serie" seleccionaremos la serie de "% en peso" de nuestra tabla de resultados.
- d.3. Para finalizar la gráfica insertaremos una líneas verticales en los puntos de cambio entre las diferentes fracciones texturales, es decir en los tamaños de grano de corte entre las fracciones de arenas, limos y arcillas. Para ello prepararemos una tabla donde escribiremos "Arcillas" y "Limos" y con los valores 0, 2, 31 (ó 50) y 100. A continuación en el cuadro de diálogo "Seleccionar origen de datos" seleccionaremos agregar y, como antes, aparecerá el recuadro de "Modificar serie", en la opción "Nombre de la serie" seleccionaremos la casilla de "Arcillas" en la opción "Valores X de la serie" seleccionaremos la casilla que contenga el nº 2 (2 veces) y en el recuadro "Valores Y de la serie" seleccionaremos los valores nº 0 y 100, apareciendo así la línea vertical de corte de nuestra gráfica. Para los Limos realizaremos el mismo proceso con la única distinción de seleccionar 31 (ó 50) en los "Valores x de la serie". Los puntos de corte de nuestra curva con estas líneas verticales nos darán el valor en porcentaje en peso de, primeramente las arcillas, y en segundo lugar de los limos, determinando las arenas por diferencia con ambas. Los cálculos de los tres porcentajes se describen a continuación:
- d.4. Porcentaje de arcilla:
% Arcilla = punto de corte entre la curva granulométrica y la línea vertical graficada a 2 µm
- d.5. Porcentaje de limo:
% Limo = punto de corte entre la curva granulométrica y la línea vertical graficada a 63 µm (o 50 µm según la referencia usada) – % Arcilla.
- d.6. Porcentaje de arena:
% Arena = 100% - % Limo - % Arcilla

3.4.2.2.1. Observaciones y realización del método.

- a. Se realizó la corrección por menisco experimental siguiendo el método descrito y se halló que el valor era igual a 0.5 unidades (g/L) a una Tª de 26° C.

$$C_m = L_m - L_{sa} \quad (30)$$

$$C_m = 4.0 - 3.5 = 0.5 \quad (31)$$

- b. Se determinó experimentalmente la corrección por defloculante del mismo modo descrito en el método y se estimó un valor de 3.5 a una Tª de 26° C.

$$C_d = L_{BD} - L_B \quad (32)$$

$$C_d = 3.5 - 0 = 3.5 \quad (33)$$

- c. Se siguieron las consideraciones de la norma NOM 021 para la corrección por temperatura Ct.
- d. Se realizó un examen previo con ±1g de la tarja de cada muestra al que se le añadió ca. 1mL de H₂O₂ al 30%, a fin de comprobar en cuáles se presentaba efervescencia y así determinar cuáles de las muestras necesitaban del tratamiento previo para destruir la materia orgánica. Los resultados de este examen se presentan en la Tabla 19.

Tabla 19. Examen previo para detectar la presencia de materia orgánica

Muestra	Efervescencia	Muestra	Efervescencia
MC_01_A1	No	MC_02_A1	No
MC_01_A2	Si Ligera	MC_02_A2	No
MC_01_A3	No	MC_02_A3	No
MC_01_B4	Si Media	MC_02_B4	Si Fuerte
MC_01_C1	Si Fuerte		
TP_01_A1	No	TP_02_A1	Si Ligera
TP_01_A2	Si Ligera	TP_02_A3	Si Fuerte
TP_01_B6	Si Ligera	TP_02_A4	Si Fuerte
TP_01_C2	Si Fuerte		
TP_01_D4	Si Fuerte		
TSA_01_A1	No	TSA_02_A1	No
TSA_01_A3	Si Fuerte	TSA_02_A2	Si Media
TSA_01_B1	No	TSA_02_A3	Si Ligera
TSA_01_B3	Si Media	TSA_02_A4	Si Fuerte
TSA_01_B4	Si Fuerte		

- e. Se realizó el tratamiento previo para eliminar materia orgánica añadiendo 40 ml de H₂O₂ al 30% en intervalos de 10 ml según lo descrito en el método, repitiendo el proceso en los casos que fue necesario y evaporando hasta la sequedad las muestras tratadas.
- f. Se siguieron todas las indicaciones descritas en el apartado b.Procedimiento de este mismo título con la única variación de que se tomaron lecturas a los 10", 20", 30", 40", 1', 3', 10', 30', 90', 120', 7 h, 8 h y 24h.
- g. Así mismo se procedió a realizar todos los cálculos descritos en el apartado c.Cálculos de este mismo título con las siguientes consideraciones:
- ~ Se estimó un valor promedio de gravedad específica del suelo G_s de 2.65 g·cm⁻¹·s⁻¹
 - ~ Con este valor se determinó el valor de θ (parámetro de sedimentación) según la tabla_ . ASTM D422 y las temperaturas observadas en el experimento
 - ~ Con el resultado se calculó el diámetro de las partículas para cada intervalo de tiempo
 - ~ Debido a que el hidrómetro disponible era el tipo 152H, se seleccionó la ecuación definida para este hidrómetro para el cálculo del porcentaje en peso W%, que contempla un valor del coeficiente de corrección por gravedad específica "a=1" según la tabla_ . para la gravedad específica estimada G_s=2.65 g·cm⁻¹·s⁻¹
 - ~ Se procedió a construir la tabla de resultados y a realizar las gráficas derivadas en el programa de cálculo Excel
 - ~ Se calcularon los porcentajes de las distintas clases texturales

3.4.2.3. Análisis por Difractometría de Rayos X

Para la determinación cualitativa y semicuantitativa de los minerales mayoritarios a través de Difractometría de Rayos X (DRX) en este estudio, se realizó la identificación mineralógica sobre dos fracciones de cada muestra, primero sobre la fracción fina (<2mm.) del total de la muestra (agregado sin orientar) y segundo sobre la fracción de arcillas (<2 μ m.) (agregado orientado) a fin de conocer el conjunto de minerales principales del suelo y tener una idea mejor de las arcillas presentes en el mismo. Todas las pruebas de DRX se llevaron a cabo en el Laboratorio de Microscopía Óptica y DRX del Instituto de Metalurgia de la UASLP.

Para la obtención de rayos X se emplean tubos específicos dotados como partes esenciales de un cátodo, un ánodo, sistema de refrigeración y ventanas de salida. Los electrones, una vez emitidos por el cátodo, son acelerados hacia el ánodo por un potencial de algunas decenas de kilovolts. En el ánodo, los rayos X se generan por el frenado de los electrones incidentes y por la excitación de los átomos en el "blanco". El primer proceso da lugar a un espectro continuo; el segundo genera líneas afiladas, ubicadas en longitudes de onda bien definidas, llamado espectro característico (Yacamán y Gasga, 1998).

a. Principio y aplicación (Ley de Bragg)

Se hace incidir un haz (de electrones, neutrones, rayos X) sobre un cristal que posee una familia

de planos atómicos paralelos definidos por sus índices de Miller (h,k,l) y separados una distancia d. Cada plano refleja una porción de la radiación. El haz incidente forma un ángulo θ sobre la familia de planos, entonces únicamente se obtienen haces difractados cuando las reflexiones en los sucesivos planos atómicos paralelos interfieran aditivamente. Esto sucede cuando la diferencia de trayectoria entre los rayos reflejados por dos planos adyacentes sea un múltiplo entero de su θ es decir:

$$n\theta = 2d\text{sen}\theta \quad (34)$$

Siendo la longitud de onda de los electrones muy pequeña esta ley se satisface para ángulos e muy pequeños, es decir rayos casi paralelos a los planos cristalinos (Yacamán y Gasga, 1998).

b. Equipos y materiales

- Mortero y pistilo de ágata
- Tamiz de acero inoxidable o de otro material inerte, malla 325 (<44 micras)
- Difractómetro de Rayos X
- Tubos Eppendorf de 2 mL
- Material normal de laboratorio
- Viales de 50 ml. para centrifuga

c. Procedimiento

c.1. Procedimiento Fracción Total

- Molturación de la muestra (al menos 2 g) en mortero de ágata, tamizada previamente a 2 mm, hasta conseguir una granulometría homogénea (tamaño polvo), y hacerla pasar a través de al menos la malla 325 (<44 μm).
- Meter el pasante de la malla en el tubo Eppendorf para trasladarlo al difractómetro.
- Una vez allí, montar el polvo compactado como una película delgada sobre una superficie adherente (vidrio). No realizar ningún deslizamiento.
- Minimizar orientaciones preferenciales causadas durante el montaje. Si la muestra es aplanada se puede modificar la orientación, teniendo diferentes composiciones conocidas de un mineral dentro de alguna matriz.

c.2. Procedimiento Fracción Arcillas

La preparación de la muestra para el análisis debe incluir los tratamientos para eliminar agentes cementantes y componentes amorfos. Ello incluye al menos la eliminación de la materia orgánica. Este es un hecho fundamental, ya que:

1. evita una dispersión adecuada
2. reduce la intensidad de las líneas de difracción de los minerales
3. evita una orientación adecuada de los minerales laminares cuando se preparan agregados orientados
4. incrementa la difusión de los rayos X en la muestra analizada
5. disminuye la intensidad del haz primario

La preparación de esta fracción requiere para su análisis de las siguientes fases:

- Disgregación de la muestra en solución acuosa mediante agitación mecánica, en este estudio se usó una alícuota del experimento del hidrómetro de Bouyoucos tomada al finalizar, tras 24h de sedimentación, asegurando así la presencia exclusiva de arcillas en la solución.
- Eliminación de la materia orgánica mediante ataque con peróxido de hidrógeno (H_2O_2 al 30%) en las muestras que hayan dado positivo en el ensayo previo.
- Concentración de la muestra por centrifugación, en viales de 50 ml., 4000 rpm. durante 10 minutos, decantación para eliminar el sobrenadante y recirculación del material sedimentado con pipeta Pasteur.
- Deseccación total del soluto a temperatura ambiente o en horno a un temperatura no superior a 35 °C, para evitar posibles desnaturalizaciones de las arcillas
- Molturación de la muestra en mortero de ágata, hasta conseguir una granulometría homogénea (tamaño polvo).
- Disposición de la fracción sobre un portamuestras de vidrio.

3.4.2.4. Capacidad de intercambio catiónico

La capacidad de intercambio catiónico (CIC) es la capacidad del suelo para retener e intercambiar diferentes cationes minerales. Esta capacidad aumenta notablemente con la presencia de materia orgánica, y podría decirse que es la base de lo que llamamos fertilidad del suelo. La CIC depende de la textura del suelo y del contenido de materia orgánica. En general, entre más arcilla y materia orgánica en el suelo, la capacidad de intercambio es mayor. El contenido de arcilla es importante, debido a que estas pequeñas partículas tienen una relación alta de área superficial a volumen. Del mismo modo, en la mayoría de los suelos la CIC aumenta cuando se presentan incrementos en el pH.

La determinación de la CIC de las muestras recogidas en campo se llevó a cabo siguiendo las directrices de la Norma Oficial Mexicana NOM-021-SERMANAT que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis.

En su punto 7.1.13 se cita que: "La determinación de la capacidad de intercambio catiónico en suelos ácidos y calcáreos y bases intercambiables, se realizó a través del método AS-13, con tiourea de plata."

a. Principio y aplicación del método AS-13 con tiourea de plata.

Método para la Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) y bases intercambiables (Ca, Mg, Na y K) de los suelos ácidos y calcáreos, empleando tiourea de plata (Ag TU) 0.01 M como solución saturante.

El procedimiento consiste en equilibrar una muestra de suelos con una solución de TUAg 0.01 M. La afinidad de este reactivo por las cargas negativas de las partículas del suelo permite una completa saturación, aún cuando el suelo contenga relativamente altas concentraciones de otras sales. Esto requiere de una sola etapa, es decir, la extracción y centrifugación, para que el intercambio sea completo. Por lo tanto el sobrenadante contendrá todos los cationes intercambiables.

b. Reactivos.

Los reactivos que a continuación se mencionan deben ser de grado analítico, cuando se hable de agua se debe entender agua desionizada. Las soluciones para este análisis deben almacenarse en recipientes de polietileno.

- b.1. Solución de nitrato de plata 0.04 M. Disolver 3.4 g de AgNO_3 en 500 mL de agua
- b.2. Solución de tiourea de plata 0.01 M. Disolver 15.0 g de tiourea en un litro de agua y filtrar a través de papel Whatman 42 o su equivalente recibiendo el filtrado en un frasco volumétrico de 2000 mL. Agregar mientras mezcla la solución de nitrato de plata 0.04 M y aforar con agua. Almacenar en la oscuridad.
- b.3. Solución de tiourea de plata 0.1M. Disolver 7.5 g de tiourea en un litro de agua y filtrar a través de papel Whatman 42 o su equivalente.
- b.4. Solución de ácido nítrico 1M. Diluir 70 mL de HNO_3 concentrado en agua aforando a 1000 ml. en un matraz volumétrico.

c. Material y equipo.

- c.1. Material común de laboratorio
- c.2. Tubos de centrifuga de propileno de 50 mL de capacidad con tapón de rosca.
- c.3. Agitador mecánico de agitación recíproca.
- c.4. Centrifuga
- c.5. Espectrofotómetro de absorción atómica.

d. Procedimiento para determinar CIC.

- d.1. Pesar 1g de muestra pasada por un tamiz de 0.5 mm de abertura.
- d.2. Pasarlo a un tubo de centrifuga de polietileno de 50 ml.
- d.3. Añadir 30 mL de solución de tiourea de plata 0.01 M.
- d.4. Prepara un blanco, es decir, a un tubo de centrifuga sin suelo, añadir 30 mL de la solución de tiourea de plata 0.01 M.
- d.5. Tapar y agitar en posición horizontal durante 4 horas.
- d.6. Centrifugar a 2500 rpm durante 10 minutos.
- d.7. Filtrar a través de papel filtro Whatman No. 41 o equivalente (solución A).

- d.8. Pipetear 0.5 mL de esta solución A a matraces volumétricos de 100 mL, diluir aproximadamente a 50 mL con agua, añadir 10 mL de HNO₃ 1 M, mezclar y aforar con agua.
- d.9. Enviar a Espectrofotómetro de Absorción Atómica para medir la concentración de plata de las diferentes muestra y el blanco

e. Cálculos

$$CIC(Cmol [+])Kg^{-1} = (b - a)x200x\frac{30}{1000}x\frac{1000}{10w}x\frac{1}{107.87} = 5.562x\frac{(b - a)}{w} \quad (35)$$

Donde:

a = Concentración de Ag medida en la muestra (mg L⁻¹)

b = Concentración de Ag medida en el blanco (mg L⁻¹)

w = peso de suelo seco (g)

f. Comentarios

La CIC no deberá expresarse como meq/100 g, ya que las unidades aceptadas por el Sistema Internacional (SI) son cmol(+) kg⁻¹, pero para que los valores de la CIC sean familiares se dividirán entre 100. Por lo tanto, la CIC es expresada como cmol (+) kg⁻¹. El signo (+) es añadido para indicar que la CIC deberá ser expresada como moles de cationes monovalentes; por lo tanto, los iones divalentes cuentan el doble.

g. Interpretación de resultados de la capacidad de intercambio catiónico (CIC)

La capacidad de intercambio catiónico (CIC) es una propiedad química a partir de la cual es posible inferir acerca del tipo de arcilla presente, de la magnitud de la reserva nutrimental y del grado de intemperismo de los suelos. El resultado numérico de la determinación sirve además como base en el cálculo del porcentaje de saturación de bases, que es un dato ampliamente usado en los estudios de fertilidad.

Con respecto al grado de intemperismo, se considera que un valor de CIC inferior que 10 cmol (+) kg⁻¹ de suelo en un horizonte B con más de 30 a 40% de arcilla indica tanto la ausencia de minerales primarios intemperizables, como la acumulación de minerales secundarios del grupo caolínico y óxidos libres.

Por lo que respecta a la reserva nutrimental se considera que ésta es abundante cuando la CIC es mayor que 25 cmol (+) kg⁻¹ de suelo. La fertilidad de los suelos se puede clasificar de acuerdo con los resultados analíticos obtenidos con métodos apropiados tanto en suelos ácidos como alcalinos.

3.4.2.5. Cationes intercambiables

Determinación de la concentración de cationes (Na, K, Ca y Mg).

Se pretendía realizar la medida y determinación del conjunto de cationes intercambiables a través del mismo Espectrofotómetro de Absorción Atómica usado para determinar la CIC, pero debido a que algunas de las concentraciones contenidas en el sobrenadante de determinadas muestras eran inferiores al límite de cuantificación de dicho equipo y por tanto arrojaban resultados poco confiables, se prefirió, con la finalidad de poder reportar todos los datos de una forma coherente y con un sistema y metodología unificado, repetir el análisis de todas las muestras usando un nuevo equipo disponible más preciso.

De este modo se realizó el análisis a través de un ICP de masas óptico, el ICP-OES iCAP 7000 series, modelo iCAP 7400 Duo, marca Thermo Scientific, perteneciente al Instituto de Geología de la UASLP y cuyas especificaciones de cuantificación se exponen en la Tabla 20.

Tabla 20. Límites de cuantificación para los cationes implicados

Elemento	Ca	Ca	K	K	Mg	Mg	Na	Na
	396.847 {85} (Axial)	184.006 {483} (Radial)	766.490 {44} (Axial)	769.896 {44} (Radial)	279.553 {120} (Axial)	280.270 {120} (Radial)	588.995 {57} (Axial)	589.592 {57} (Radial)
Límite Inferior de cuantificación del Método (L.I.C.) en mg/l	0.0503	4.1102	0.0453	3.3401	0.0071	0.0579	0.0543	0.2488
Límite Superior de cuantificación del Método (L.S.C.) en mg/l	0.7922	496.0717	3.6375	44.6472	0.7820	47.3326	0.7776	99.8646

3.4.2.6. Contenido de materia orgánica

Estimación directa de materia orgánica a través del método de Pérdida por Calcinación.

a. Principio y aplicación

El análisis de pérdida por calcinación se utiliza para determinar el contenido de materia orgánica (%MO) de una muestra de suelo. Este es un procedimiento relativamente simple en comparación con otros utilizados para determinar el porcentaje de materia orgánica ya que no implica el uso de ningún producto químico, sólo el uso de un horno del tipo mufla.

- La muestra secada al aire, tamizada a <2 mm de suelo y presecada por 24 horas, se emplaza en el horno y se calcula el %MO comparando el peso de antes y después del procedimiento.
- Antes de la calcinación la muestra contiene materia orgánica, pero después de ella solo que queda la parte mineral del suelo.
- La diferencia de peso antes y después de la calcinación representa la cantidad de la MO que estaba presente en la muestra.
- Este método es aplicable a todos los tipos de suelos.

b. Material y equipo

- Crisoles de porcelana o recipientes de metal
- Báscula (precisa a 0.001 g)
- Horno de mufla
- Desecador
- Pinzas
- Guantes de seguridad para horno
- Cuchara
- Tamiz (tamaño de 2 mm)
- Molinillo de café

c. Procedimiento

c.1. Trabajo pre-calcinación

- Las muestras deben haber sido secadas en un horno de laboratorio a 105 °C durante 24 horas. Para este fin pueden ser colocadas en bandejas.
- Recuerde etiquetar las bandejas con la identificación de la muestra.
- Calentar los crisoles de porcelana durante 1 hora a 375 °C en la mufla. Enfriar a puerta abierta hasta unos 150 °C. Colocar en el desecador, y enfriar durante 30 minutos, y pesar. Este será el peso del crisol (W_{cr}).
- Tener las muestras de suelo a las que desea realizar los experimentos preparadas de antemano.
- Las muestras deben ser de tamaño de 2 mm o más fino. En suelos minerales se pueden tamizar con un tamiz de 2 mm. Para muestras de suelo forestal con material particulado grande se deben moler a un tamaño de 2 mm.
- Colocar las muestras en un desecador tras sacarlas del horno. Recuerde que debe apagar el horno.
- Llevar las muestras del desecador a una báscula (precisión de 0.001 g) y pesar 5.0 \pm 0.001 g de cada muestra y colocar cada uno en un crisol.
- Este será el peso pre-calcinación (W_{pre}).
- Asegúrese de registrar el número de cada crisol correspondiente a cada muestra
- Regresar los crisoles al desecador después de ser pesados.
- Transportar las muestras a la mufla en el desecador, espere a que la mufla se caliente a 375 °C.
- Coloque los crisoles en el horno después de que la mufla haya alcanzado la temperatura deseada, las muestras deben permanecer en el horno durante 16 horas (durante la noche). Con esto se pretende calentarlas el tiempo suficiente para asegurar que la materia orgánica ha sido totalmente calcinada

c.2. Trabajo post-calcinación

- Una vez se ha cumplido el tiempo de calcinación, dejar las muestras se enfríen a ca. 150°C a puerta abierta. Puede verificar la temperatura de la mufla mediante la lectura

de la pantalla incorporada.

- Tras alcanzar la temperatura de *ca.* 150 °C extraer las muestras del horno y colocarlas en el desecador con unas pinzas.
- Esperar 30 minutos, retirar las muestras del desecador y pesarlas.
- Recuerde restar el peso del crisol
- Este será su peso post-calcinación (W_{post}).

d. Cálculos

- Calcular el % MO utilizando la siguiente ecuación:

$$\%MO = \frac{W_{pre} - W_{post}}{W_{pre}} \times 100 \quad (36)$$

3.4.2.7. Conductividad eléctrica. Extracto 1:5 y determinación por conductivimetría

La conductividad eléctrica (CE) es una expresión numérica de la capacidad de una solución acuosa para conducir una corriente eléctrica. La CE en equilibrio en una suspensión acuosa de suelo, lodos o residuos biológicos, se expresa como miliSiemens por metro (mS/m). (ISO 11265, 1994; ISO 3696 EN, 1997).

a. Principio y alcance

- a.1. La muestra seca a 40°C ±2°C y <2 mm de suelo se extrae con agua a 20°C±1°C en una relación muestra:agua de 1:5 para disolver las sales. En el extracto filtrado se mide la conductividad eléctrica (CE) corregida a 25°C.
- a.2. Este método es aplicable a todos los tipos de suelos.

b. Interferencias y fuentes de errores

Los valores medidos de la conductividad eléctrica pueden ser influenciados por la contaminación de los electrodos.

Las burbujas de aire en los electrodos perturban las mediciones. Las mediciones <1 mS/m se ven influenciadas por el dióxido de carbono gaseoso (CO₂) o el amoníaco (NH₃) procedente de la atmósfera. En estos casos, las mediciones se llevan a cabo en una célula de medición adaptada. Este aspecto no se trata adicionalmente en esta norma europea.

c. Equipos y materiales

- c.1. Envases de plástico de polietileno de capacidad adecuada para contener los analitos (*ca.* 150 mL.)
- c.2. Agitador recíproco con ajuste de temperatura a 20 °C ±1 °C y lo suficientemente vigoroso como para mantener la suspensión o que esté emplazado en una habitación de temperatura constante a 20 °C ± 1°C.
- c.3. Papel filtro de bajo contenido en cenizas y de grandes propiedades retentivas, en este caso se usó papel filtro Whatman nº 41 de tamaño de poro de 0.25 µm.
- c.4. Conductímetro de exactitud de al menos 0.01 dS/m (10 µS/cm) y equipado con corrección automática de temperatura y control de la constante de la celda.

d. Reactivos

Durante el análisis, usar solamente reactivos de grado analítico reconocido y agua de clase 1 según la EN ISO 3696 (CE ≤ 0.2 mS/m a 25°C) y con un pH > 5,6.

- d.1. Solución de cloruro de potasio, KCl, 0.1 mol/L. Disolver 7.456 g de cloruro de potasio, KCl, secado a 105 °C durante 24 horas, en agua en un matraz aforado de 1000 mL y enrasar con agua. La conductividad eléctrica específica de esta solución es 12.9 dS/m (12.9 mS/cm) a 25 °C.
 - d.2. Solución de cloruro de potasio, KCl, 0.02 mol/L. Diluir 20 mL de la solución de KCl 0.1 mol/L a 100 mL con agua. La conductividad eléctrica específica de esta solución es 2.77 dS/m (2.77 mS/cm) a 25°C.
 - d.3. Solución de cloruro de potasio, KCl, 0,01 mol/L. Diluir 10 mL de la solución de KCl 0,1 mol/L a 100 mL con agua. La conductividad eléctrica específica de esta solución es 1.41 dS/m (1.41 mS/cm) a 25 °C.
- Nota 1. Las soluciones de KCl d.1, d.2 y d.3 deben almacenarse herméticamente cerradas en

envases de polietileno.

- Nota 2. Pueden usarse soluciones estándares comerciales de conductividad eléctrica disponibles en el mercado.

e. Procedimiento

e.1. Extracción

- Pesar 20 g (exactitud 0.1 g) de muestra seca 40 °C ± 2 °C y tamizada a < 2mm de suelo, en un frasco plástico de 150 mL (c.1.). Incluir dos blancos.
- Agregar 100 mL de agua a 20 °C ±1 °C y tapar el frasco.
- Colocar el frasco en posición horizontal en el agitador (c.2.) y agitar durante 30 minutos a 20 °C ±1 °C.
- Nota 3. La velocidad de la agitación debe ser sólo la suficiente para producir y mantener la suspensión. Una agitación más vigorosa puede provocar una excesiva dispersión de la arcilla, dificultando la filtración posterior.
- Filtrar por papel filtro plegado (c.3.) y colectar el filtrado.

e.2. Determinación de la constante de la celda.

- Medir la conductividad eléctrica (CE) de las soluciones de cloruro de potasio (d.1, d.2, y d.3) de acuerdo a las instrucciones del fabricante del conductivímetro.
- Calcular, para cada solución de KCl, la constante de la celda según:

$$K = \frac{CE_e}{CE_m} \quad (37)$$

donde:

K = constante de la celda

CE_e = CE específica de una de las soluciones de KCl en dS/m (mS/cm)

CE_m = CE medida de la misma solución de KCl en dS/m (mS/cm)

- Calcular el promedio de los valores de la constante de la celda y ajustar a ese valor la constante de la celda del conductivímetro.
- Nota 4. La constante de la celda promedio no debe diferir en más de un 5% del valor dado por el fabricante.

e.3. Medición de la conductividad eléctrica del filtrado.

Medir la CE, corregida a 25 °C, del filtrado (e.1.4) de acuerdo con las instrucciones proporcionadas por el fabricante del medidor de conductividad. Anotar los resultados en decisiemens por metro, dS/m, con dos decimales.

- Nota 5. Llevar a cabo la determinación de los blancos en cada lote de muestras mediante el tratamiento de agua de la misma manera que la muestras. La conductividad eléctrica de los blancos no debe exceder de 0,01 dS/m (10 µS/cm). Si esto ocurre, repetir la extracción desde el principio (punto e.1).
- Nota 6. Las correcciones de temperatura de los valores medidos se hacen mediante la adición de 2% del valor medido (temperatura de medición <25 °C) o restando un 2% del valor de medición (temperatura de medición > 25 °C) para cada grado de diferencia.

f. Informes

f.1. Informar el resultado obtenido en e.3., con dos decimales si es <1 dS/m o con tres cifras significativas si es ≥1 dS/m, como:

- Conductividad eléctrica 1:5 (CE-1:5) = ... dS/m

3.4.2.8. Determinación de pH

Determinación potenciométrica de pH medido en agua desionizada (Richards, 1974).

El pH es una propiedad química del suelo que tiene varios efectos importantes, tanto en el desarrollo de los seres vivos (incluidos microorganismos y plantas) como por ejemplo sobre la estructura del suelo ya que los efectos del sodio son más significativos en los altos niveles del pH de suelo. La lectura de pH se refiere a la concentración de iones hidrógeno activos (H⁺) que se da en la interfase líquida del suelo, por la interacción de los componentes sólidos y líquidos. La concentración de iones hidrógeno es fundamental en los procesos físicos, químicos y biológicos del suelo. El grado de acidez o alcalinidad de un suelo es determinado por medio de

un electrodo de vidrio en un contenido de humedad específico o relación de suelo-agua, y expresado en términos de la escala de pH. El valor de pH es el logaritmo del recíproco de la concentración de iones hidrógeno, que se expresa por números positivos del 0 al 14. (Richards, 1974; EPA, 1995; ISO 10390, 2005; ISO 3696 EN; 1987)

a. Principio y alcance

El método potenciométrico o electroquímico para medir pH de un suelo es el más utilizado. Con este método se mide el potencial de un electrodo sensitivo a los iones H^+ (electrodo de vidrio) presentes en una solución problema; se usa como referencia un electrodo cuya solución problema no se modifica cuando cambia la concentración de los iones por medir, que es generalmente un electrodo de calomelano o de Ag/AgCl. El electrodo, a través de sus paredes, desarrolla un potencial eléctrico. En la práctica se utilizaron soluciones amortiguadoras, de pH conocido, para calibrar el instrumento y luego comparar el pH directamente de la solución por evaluar.

- a.1. Se prepara una suspensión de suelo seco a $40\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $<2\text{ mm}$, con agua en una proporción muestra:agua de 1:1, y en el sobrenadante se determina el valor del pH en agua, con un medidor de pH.
- a.2. Este método es aplicable a todos los tipos de suelos.
 - Nota 1. En suelos orgánicos aumentar la relación muestra:agua a 1:5.

b. Equipos y materiales

- b.1. Agitador recíproco o varillas de vidrio o de plástico.
- b.2. Medidor de pH con ajuste de pendiente y control de temperatura.
- b.3. Electrodo de vidrio y de referencia o electrodo combinado.
- b.4. Termómetro.
- b.5. Recipientes de vidrio o plástico de al menos 50 mL de capacidad.
- b.6. Balanza analítica.

c. Reactivos

Durante el análisis, usar solamente reactivos de grado analítico reconocido y agua de clase 1 según la ISO 3696 EN ($CE \leq 0.5\text{ mS/m}$ a $25\text{ }^{\circ}\text{C}$) y con un $\text{pH} > 5.6$.

- c.1. Soluciones tampones de pH 4.00, 7.00 y 9.22 (o similares), disponibles en el mercado.

d. Procedimiento

- d.1. Pesar en un recipiente (b.5), 10 g (exactitud 1 g) de suelo seco a $40\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $< 2\text{ mm}$.
- d.2. Agregar 10 mL de agua a una temperatura entre 20°C y 25°C .
- d.3. Agitar vigorosamente la suspensión durante 30 min usando el agitador (b.1) y dejar reposar.
- d.4. Calibrar el medidor de pH siguiendo las instrucciones del fabricante y usando dos soluciones tampones, la de pH 7.00 y una de las siguientes: pH 4.00 o pH 9.22, dependiendo del rango de pH de las muestras.
- d.5. Si los electrodos no cuentan con termocompensador, medir la temperatura de la suspensión y cuidar que no difiera en más de 1°C de la temperatura de las soluciones tampones que deben estar a una temperatura de $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $25\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- d.6. Agitar la suspensión e introducir los electrodos (b.3).
- d.7. Leer el pH, una vez estabilizada la lectura, y anotar el valor con dos decimales.
 - Nota 2. La lectura puede considerarse estable cuando el pH medido en un período de 5 s varía en no más de 0.02 unidades. El tiempo requerido para la estabilización generalmente es de 1 min o menos, pero puede depender de numerosos factores, incluyendo:
 - ~ el valor del pH (en suelos alcalinos es más difícil alcanzar la estabilización de la lectura del pH);
 - ~ la calidad y antigüedad del electrodo de vidrio;
 - ~ las diferencias de pH entre las muestras de una serie;
 - ~ la mezcla mecánica de la suspensión antes de la medición de pH puede ayudar a lograr lecturas estables en un menor tiempo.
 - Nota 3. En las muestras con alto contenido de materia orgánica y/o arcilla puede ocurrir el

efecto de suspensión. En los suelos calcáreos la suspensión puede adsorber dióxido de carbono. En estas circunstancias y en los suelos con bajos contenidos de sales solubles es difícil alcanzar un pH estable.

d.8. Definir el tipo de suelo según su pH de acuerdo a la Tabla 21.

Tabla 21. Criterios de evaluación de un suelo con respecto a su pH.
Fuente: NOM-021-RECNAT-2000

Categoría	Valor de pH
Fuertemente ácido	< 5.0
Moderadamente ácido	5.1 - 6.5
Neutro	6.6 - 7.3
Medianamente alcalino	7.4 - 8.5
Fuertemente alcalino	8.5

3.4.2.9. Test de dispersividad o *Crumb Test*

a. Principio y alcance

El ensayo de Emerson Crumb (conductivimetría, Emerson, 1967), *test* de dispersividad o *Crumb Test* es un procedimiento para evaluar la dispersividad a través de terrones (*crumbs*) de suelo natural, que da una buena y rápida indicación de si un suelo es dispersivo.

Tiene algunas limitaciones en su utilidad ya que un suelo dispersivo puede a veces dar una reacción no dispersiva, por ejemplo aquellos suelos que contienen caolinita con conocidos problemas de dispersión de campo, han demostrado en ocasiones, reacciones no dispersivas en el procedimiento, sin embargo si el *Crumb Test* indica dispersión, el suelo es probablemente dispersivo, por lo que se deduce que es un mejor indicador de suelos dispersivos que de suelos no dispersivos.

No se debe usar suelo secado al horno para preparar las muestras para el test, es decir los terrones, ya que podrían ocurrir cambios irreversibles en las propiedades fisicoquímicas de la relación poros-agua del suelo responsables de la dispersión, por eso se recomienda que se mantengan con su humedad natural.

Cuando el suelo es dispersivo los componentes coloidales del suelo se dispersan en suspensión disgregando por completo el terrón y manteniéndose en una nube en suspensión por largos intervalos de tiempo.

Se ha comprobado que determinados suelos pueden dar resultados no dispersivos en agua pero sí en una solución de hidróxido sódico 1 normal, por lo que se recomienda realizar ambos test.

El experimento se basa en la comparativa entre las fotos que se realizan en la condición inicial del test, nada más sumergir los terrones en líquido, con la foto que se realiza transcurrida una hora, sin que se haya producido ninguna perturbación mecánica.

b. Materiales

- ~ Terrones de suelo de 1-2cm³
- ~ Placas Petri de 80mL
- ~ Agua desionizada
- ~ Solución 1 N de NaOH
- ~ Reloj o cronómetro
- ~ Cámara de fotos

c. Procedimiento

Preparar las placas sobre una superficie plana a ser posible blanca, sobre la que no se produzca ningún movimiento o vibración.

Rellenar casi hasta el borde (± 75 mL) ya sea con agua o con la solución NaOH 1N.

Introducir cuidadosamente el terrón en el líquido al tiempo que se conecta el cronómetro.

Realizar en el mismo instante la foto inicial, se recomienda usar un tripié para mantener la misma escala de las fotos. Dejar correr el tiempo sin que se produzca ninguna perturbación y

realizar otra foto pasada una hora (también se puede realizar una intermedia a la media hora). Comparar las fotos inicial y final y establecer el rango de dispersión que ha sufrido la muestra.

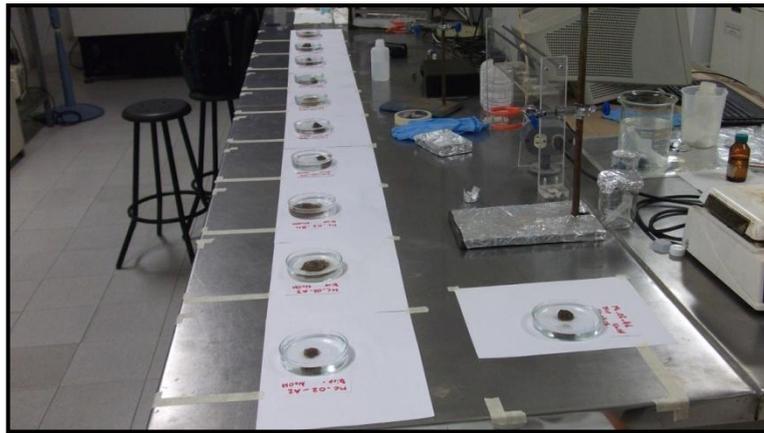


Figura 25. Realización del Test de dispersividad o *Crumb Test*. Fuente: Fotografía propia

3.4.2.10. Densidad Real y densidad aparente

a. Principio y alcance

El suelo como todo cuerpo poroso tiene dos densidades. La densidad real (densidad media de sus partículas sólidas) y la densidad aparente (que tiene en cuenta el volumen de poros)

No obstante, considerando que la mayor parte de los componentes del suelo (aluminosilicatos, sílice) poseen una densidad oscilante entre 2.6 y 2.7 g/cm³, se suele tomar un valor medio de 2,65 gr/cm³ (valor adoptado al realizar el análisis granulométrico).

Se realizó el análisis de densidades según el método descrito por Richards, 1974

b. Materiales

- ~ Muestras de suelo tamizadas a 2mm.
- ~ Bureta 100 mL
- ~ Vaso de precipitado de 100 mL
- ~ Báscula precisión
- ~ Material normal de laboratorio

c. Procedimiento

Densidad Real

- Pesarse 10 g de muestra (dato w) y vaciar en un matraz de 100 mL
- Llenar la bureta analítica con 100 mL de agua
- Aforar a 100 mL el matraz con la muestra
- Medir el volumen de agua que quedó en la bureta (dato V)
- Obtener la densidad real (δ_r) con la siguiente fórmula:

$$\delta_r = w/V \quad (38)$$

Densidad Aparente

- Pesarse una probeta de 10 mL completamente seca (dato P)
- Agregar muestra hasta que se compacte lo más posible (golpeando); medir el volumen que ocupa la muestra en la probeta (dato V)
- Pesarse la probeta con la muestra (dato Pm)
- Calcular la densidad aparente (δ_a) con la siguiente fórmula:

$$\delta_a = Pm-P/V \quad (39)$$

3.4.2.11. Porosidad

a. Principio y alcance

La porosidad o fracción de huecos es una medida de espacios vacíos en un material, y es una fracción del volumen de huecos sobre el volumen total, entre 0 y 1, o como un porcentaje entre 0 y 100%.

b. Procedimiento

Calcular a partir de los datos de las densidades real y aparente, mediante la fórmula:

$$\text{Porosidad (Prd)} = (\delta_r - \delta_a / \delta_r) * 100 \quad (40)$$

3.5. Evaluación de la erodibilidad y del proceso

La evaluación de la erodibilidad desarrollada en este proyecto se pudo conformar una vez terminados todos los análisis de los parámetros físicos y químicos designados como fundamentales para la elaboración de este estudio.

Para este fin se usó el **software KUERY1.4** de Borselli *et al.* (2012), nunca antes usado sobre suelos mexicanos. Aunque parezca que se estimó según ecuaciones físicamente basadas, el algoritmo en si es dependiente de mediciones empíricas y resultados de laboratorio, además introduce un nuevo concepto al tomar en cuenta las consideraciones climáticas del área de estudio. Esto se debe a que la reciente re-elaboración de la Base de Datos Global de Erodibilidad del suelo (EGD por sus siglas en inglés) de Torri *et al.* (1997) por parte de Salvador-Sanchis *et al.* (2008) demostró que existe un efecto climático significativo sobre la erodibilidad del suelo, que permite una división de los datos en dos subconjuntos, uno con condiciones frías dominantes y otro con condiciones cálidas dominantes.

En si es un concepto bastante innovador y un software que realiza una muy buena aproximación a los valores del Factor K (erodibilidad) porque trata con este tipo de variación, calculándola a través de la distribución de frecuencias de los valores de erodibilidad del suelo observados para los datos texturales, de materia orgánica y climáticos determinados. Así el usuario final del algoritmo tendrá la posibilidad de decidir, en base a los conocimientos locales, que valor se debe usar.

Además el **software** es **freeware**, completamente gratuito ya que la aplicación de los algoritmos y la metodología propuesta, está disponible para los usuarios y la comunidad científica.

Definición del algoritmo

Los malos resultados de las técnicas estadísticas clásicas, que se han aplicado en estudios anteriores (por ejemplo Römkens *et al.*, 1997; Salvador-Sanchis *et al.*, 2008; Torri *et al.*, 1997, 2002; citados en Borselli *et al.*, 2012) para el análisis de la base de datos global de erodibilidad del suelo (EGD: Poesen *et al.*, 1994; Torri *et al.*, 1997, 2002; citados en Borselli *et al.*, 2012) han llevado a explorar formas alternativas con el fin de inferir el rango de incertidumbre de los valores de K, asociados a cada combinación de clima y parámetros del suelo relevantes (*input*). En este algoritmo los parámetros del suelo considerados son los siguientes:

- a) el logaritmo de la media geométrica de la distribución de tamaño de partícula (D_g), utilizado también por Torri *et al.* (1997, 2002), que puede calcularse directamente según Shirazi *et al.* (1988; citado en Borselli *et al.*, 2012):

$$D_g = \sum_i f_i \log_{10} (\sqrt{d_i - d_{i-1}}) \quad (41)$$

donde f_i es la fracción de la masa de la clase de partículas con la gama de diámetros de d_i y d_{i-1} (en mm). Si sólo están disponibles los tres principales componentes texturales del suelo estudiado, es decir, de arena (S), limo (L) y arcilla (C), el argumento de la raíz cuadrada en la ecuación (2) se puede calcular como se muestra en la Tabla 1 o usando la fórmula simplificada (Borselli *et al.*, 2009), D_g también puede ser calculado por una fórmula simplificada (Borselli *et al.*, 2009) si sólo los tres principales componentes texturales de suelo: la arena (S), limo (L) y arcilla (C) están disponibles .

$$D_g = \frac{-3.5C - 2.0L - 0.5S}{100} \quad (42)$$

donde C, L y S son, respectivamente, el porcentaje de las tres principales clases texturales, arcilla, limo y arena (Tabla 22).

Tabla 22. Constantes utilizadas para el cálculo del parámetro D_g , en el caso de tres componentes texturales básicas. ^a Convencionalmente, el límite inferior de las partículas de arcilla se fija igual a 0,00005 (mm)

Textural component	d_i (mm)	d_{i-1} (mm)	$d_i d_{i-1}$ (mm ²)	$\log_{10}(\sqrt{d_i d_{i-1}})$
ARCILLA	0.002	0.00005 ^a	0.0000001	-3.5
LIMO	0.05	0.002	0.0001	-2
ARENA	2	0.053	0.1	-0.5

b) el segundo parámetro de textura (S_g) es el logaritmo de la desviación estándar geométrica de D_g , ya definido por Shirazi y Boersma (1984) y Shirazi *et al.* (1988) (citados en Borselli *et al.*, 2012); S_g se calcula con la siguiente ecuación

$$S_g = \sqrt{\sum_i f_i [\log_{10} \sqrt{d_i - d_{i-1}} - D_g]^2} \quad (43)$$

Borselli *et al.* (2009) también propuso una ecuación simplificada para S_g si para un suelo dado sólo los tres principales componentes texturales C, L y S son conocidas:

$$S_g = \sqrt{\frac{[C(-3.5 - D_g)^2 + L(-2.0 - D_g)^2 + S(-0.5 - D_g)^2]}{100}} \quad (44)$$

Obviamente las ecuaciones simplificadas (3) y (5) hacen los cálculos más fáciles, pero son aproximaciones menos exactas que las ecuaciones. (2) y (4) que se usaron para desarrollar el algoritmo;

- c) el porcentaje de materia orgánica del suelo (MOS);
- d) el porcentaje de contenido fragmento de roca (Rk).

Subconjuntos de erodibilidad del suelo

La base de datos de erodibilidad global (EGD) se subdividió en cuatro subgrupos, de acuerdo con el clima (dos grupos) y para el contenido de fragmentos rocosos (Rk: dos grupos: menos y más del 10% de masa de fracción de contenido rocoso). El algoritmo de optimización se puso en marcha para todos los parámetros del suelo. Algunos de estos parámetros no produjeron resultados aceptables o útiles y fueron retirados en consecuencia. Las variables finales "explicativas" eran ligeramente diferentes en cada grupo como se describe a continuación, de acuerdo con los hallazgos de Salvador Sanchis *et al.* (2008):

- Grupo 1) clima frío suelo fino: D_g , S_g , SOM;
- Grupo 2) clima frío suelo pedregoso: D_g , $Rk > 10\%$;
- Grupo 3) clima cálido suelo fino: D_g , S_g , SOM;
- Grupo 4) clima cálido suelo pedregoso: D_g , $Rk > 10\%$.

La evaluación del proceso de erosión se llevó a cabo diseñando la comparativa entre dos modelos de erosión uno ampliamente usado en territorio nacional, el modelo USLE y otro que en principio no se conoce que haya sido usado en suelos mexicanos el modelo MPSIAC, ambos ya definidos con anterioridad. Este último ha sido usado con éxito en diferentes lugares del mundo que mantienen unas condiciones de aridez muy parecidas a las que se presentan en esta región y como no, en el área de estudio.

4. El modelo numérico del proceso de erosión

4.1. Matemáticas del desprendimiento, flujo, transporte y sedimentación.

Como ya fue citado la erosión del suelo se refiere a una serie de procesos que conducen al desgaste y agotamiento del suelo y la exportación de sedimentos hacia las zonas bajas. Esto ocurre a través de tres procesos principales, primero la humectación y desprendimiento de las partículas, agregados, terrones y posiblemente grandes volúmenes de suelo, seguido del movimiento de todo este material desprendido y finalmente la deposición de este material.

Así pues, con respecto a la humectación y el desprendimiento, tal y como las gotas de lluvia impactan, desprenden y compactan el suelo, lógicamente su contenido de agua cambia. La humectación del suelo tiene un efecto de debilitamiento de las fuerzas estructurales (por ejemplo fuerzas de *Van der Waals*) de las partículas debido a la desaparición del componente capilar, al ir aumentando el contenido general de agua en el suelo.

Además de que se van produciendo otros procesos químicos, por la interacción entre las partículas de suelo, el agua y los iones presentes en la solución, responsables de la dispersión de las partículas. De este modo la dispersión favorece los procesos de obturación de poros, lo que disminuye la infiltración y aumenta la producción de flujos superficiales, es decir la escorrentía.

También hay que tener en cuenta que el impacto de las gotas es responsable de gran parte del material desprendido, de producir cambios en la morfología superficial y realizar un efecto de sellamiento.

Cuando las gotas impactan la superficie del suelo, la comprimen y producen una corona de expulsión lateral de material desprendido, en forma de un microcráter. La velocidad final de caída varía con el diámetro de la gota según:

$$V_f = 9.38 \tan h (0.44\theta) \quad (45)$$

donde:

V_f = velocidad final de impacto en $m s^{-1}$

θ = diámetro de la gota

Las partículas son eyectadas en base a un ángulo de eyección (medido entre el suelo y la trayectoria de eyección). Su cálculo difiere de si el suelo ya posee un fina capa de agua o si ésta está ausente.

Para suelo seco el ángulo parece variar inversamente a la resistencia del suelo:

$$\zeta = 40.6T^{-0.42} \quad (46)$$

donde:

ζ = ángulo de expulsión

T= resistencia al corte superficial medida con tester de campo en kPa

Para suelo con un film de agua el ángulo cambia con la profundidad de dicho film:

$$\tan \zeta = 11.4 h^{0.84} + 0.6 \quad (47)$$

donde:

h= profundidad del film de agua en cm

La velocidad de las partículas eyectadas puede superar en 8 veces la velocidad de impacto de las gotas. El potencial de las gotas para desprender material puede ser calculado de varias formas, la energía cinética en el momento del impacto suele ser el más usado:

$$D_s = k_s[E - E_o] \quad (48)$$

donde:

D_s = es el suelo desprendido en kg/m^2

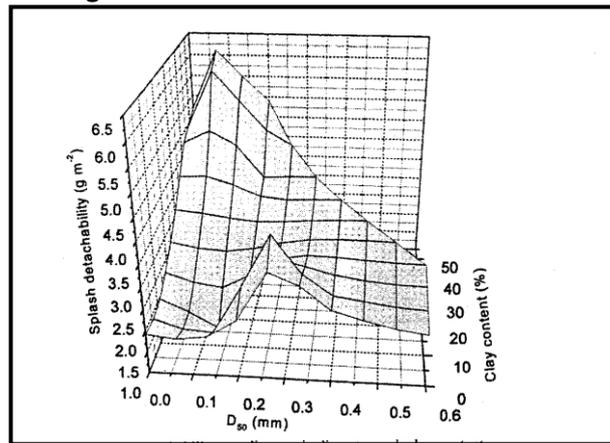
k_s = es la despredibilidad del suelo

E= es la energía cinética en el momento del impacto en kJ/m^2

E_o = se define como el umbral de energía para que se inicie el proceso de desprendimiento

Las tendencias de los valores de k_s se pueden observar en la Figura 26.

Figura 26. Tendencias de los valores de Ks



Fuente: Capítulo 7 *Water Erosion. Handbook of Soil Science.* (Sumner, 2000)

Cuando se produce el impacto sobre una superficie inclinada, los granos expulsados son impulsados principalmente cuesta abajo más que en la dirección ascendente de la pendiente, bajo estas condiciones el grado de desprendimiento incrementa con el gradiente de la pendiente. Esto provoca un movimiento neto pendiente abajo de las partículas. A nivel local, esto causa que los sedimentos rellenen las depresiones mientras que los puntos sobresalientes se erosionan. Generalmente el material eyectado se deposita a cierta distancia del impacto, la relación de cantidad de este material suele decrecer exponencialmente con la distancia por lo que dicha distancia suele relacionarse con el diámetro medio:

$$X = 0.03D_{50}^{-0.218} \pm 0.301 \sin \alpha \quad (49)$$

donde:

X= distancia de eyección

D_{50} = diámetro medio de las partículas eyectadas en mm

α = gradiente de la pendiente

\pm = positivo cuando el movimiento es a favor de la pendiente y negativo cuando es en contra de la pendiente

Claramente el impacto de las gotas incrementa la capacidad de transporte de la escorrentía superficial, aumentando así la erosión del suelo. El flujo neto de partículas erosionadas puede calcularse a través de relaciones empíricas según Poesen y Salvat, 1981

$$F = k_s E [0.301 \sin \alpha + 0.0192 D_{50}^{-0.218} (1 - c^{-2.42 \sin \alpha})] \quad (50)$$

donde:

F= es el flujo neto de partículas erosionadas

E= es la energía del impacto

Y para calcular E

$$E = E_d e^{-B_H h} \quad (51)$$

donde:

E_d = es la energía de las gotas justo antes del impacto

B_H = es un coeficiente empírico dependiente de las características de la superficie del suelo relacionadas con la granulometría que puede ser estimado según la fórmula de Torri *et al*, 1987

$$B_H = 0.361n \left(6 \frac{D_{95}}{D_{50}} \right) \quad (52)$$

donde:

D_{95} = Es el diámetro de grano por debajo del cual se produce el 95% de las partículas del suelo (en peso)

Por otro lado la erosión producida por el impacto de las gotas se ve modificada en gran medida por el grado de cobertura vegetal del suelo. La vegetación intercepta las gotas de lluvia y subdivide el proceso en tres etapas, (1) gotas que quedan almacenadas en las hojas y ramas que finalmente se evaporan, (2) aquellas que superan la capacidad de almacenamiento y re-gotean y (3) las que se concentran hacia el centro de la planta y fluyen por el tronco hasta alcanzar el suelo. Esto claramente reduce la energía de impacto de las gotas ya que (1) y (3) son procesos que dejan de impactar en el suelo. Es por esto que en los modelos se suele incluir un factor C o de cobertura de la vegetación, que tendremos en consideración más adelante.

Con respecto al flujo superficial de agua hay que tomar en consideración que también desprende y transporta las partículas del suelo y agregados. Por lo tanto, las principales características de flujo superficial (difuso y concentrado) deben ser comprendidas y calculadas correctamente si queremos entender la erosión, y también cuáles de las características de los suelos y la vegetación son relevantes. Las características hidráulicas del flujo se describen por su número de Reynolds (Re) y su número de Froude (F), que se define como sigue. El número de Reynolds es un índice de la turbulencia del flujo. Cuanto mayor es la turbulencia, mayor es el poder erosivo generado por el flujo. Con números inferiores a 500 el flujo laminar prevalece y con valores por encima de 2000 el flujo es totalmente turbulento. Los valores intermedios son indicativos de flujo transitorio o perturbado, a menudo resultado de la turbulencia que se imparte al flujo laminar debida al impacto de las gotas de lluvia. El número de Froude es un índice de si se formarán o no las ondas de gravedad en el flujo. Cuando el número de Froude es menor que 1.0, las ondas de gravedad no se forman y el flujo siendo relativamente suave, se describe como tranquilo o subcrítico. Números de Froude mayores que 1.0 denotan flujos rápidos o supercríticos, caracterizados por ondas de gravedad, que son más erosivas.

Las fuerzas de resistencia al desprendimiento son el peso del grano, su ángulo de fricción con granos circundantes, y las fuerzas de cohesión con la que cada grano se adhiere a la masa de suelo. El desprendimiento opera a través de las fuerzas de arrastre y elevación, que son más o menos proporcionales a la velocidad de flujo al cuadrado. La velocidad del flujo se expresa según la fórmula

$$v = \frac{h^{2/3} s^{1/2}}{n} \quad (53)$$

donde:

h = es la profundidad del radio hidráulico
s = es la rugosidad de la superficie y la pendiente
n = es el coeficiente de Manning de rugosidad

Una forma simple de calcular el coeficiente de Manning es:

$$n = \frac{0.172RR^{0.74}}{Re^{0.282}} \quad (54)$$

donde:

Re = es el No. de Reynolds
RR = (mm) es una medida de la rugosidad de la superficie del suelo al azar, es decir, irregularidades de la superficie, tales como terrones que no puedan ser percibidos como orientados en cualquier dirección preferencial.

Básicamente, el desprendimiento de una partícula de suelo individual de la masa de suelo se produce cuando las fuerzas ejercidas por el flujo superan las fuerzas de mantenimiento de la partícula en reposo. Tan pronto como el grano es arrastrado la escorrentía lo acelera hacia una velocidad que se aproxima la velocidad de flujo local. Al mismo tiempo, la gravedad tiende a llevar el grano de nuevo a la superficie del suelo hasta que el grano se deposita eventualmente.

El desprendimiento debido a la escorrentía a menudo se modela utilizando ecuaciones que estiman las fuerzas de escorrentía utilizando el poder de corriente del fluido (p) o la tensión de corte del flujo (τ_F) aplicado a la superficie del lecho del canal.

$$p = \delta g q \sin \gamma \quad (55)$$

$$\tau_F = \delta g h \sin \gamma \quad (56)$$

donde:

p = es el poder de corriente del fluido en peso/m²
 τ_F = es la tensión de corte del flujo
 γ = es el gradiente en radianes del lecho del canal (con frecuencia igual a la inclinación de la pendiente local)
q = Q/w es la descarga unitaria, que también se puede definir como q=hv (profundidad por velocidad)

Las trayectorias seguidas por las partículas arrastradas durante el transporte y la sedimentación pueden ser bastante complejas, algunos granos son transportados en contacto con la superficie del suelo, rodando o deslizándose, otros en suspensión o por saltación. El concepto de capacidad de transporte de flujo es un medio para superar este problema. La capacidad de transporte se define como la cantidad de sedimento que un flujo dado puede transportar, sobre una longitud que tiende al infinito cuando las tasas de desprendimiento y de deposición son iguales.

La capacidad de transporte del flujo propuesta por Morgan (1980) teniendo en consideración la hidráulica del transporte de sedimento es:

$$T_c = 0.0061Q^{1.8}s^{1.13}n^{-0.15}D_{35}^{-1} \quad (57)$$

donde:

T_c = es la capacidad de transporte

Q = es la tasa de descarga o flujo

s = es la rugosidad de la superficie y la pendiente

n = es el coeficiente de Manning de rugosidad

D_{35} = define el tamaño de las partículas del material de la superficie en las que 35 por ciento de los granos son más finos.

Una vez conocida la capacidad de transporte (T_c), la tasa de erosión neta debido al arrastre del flujo superficial se puede evaluar como un déficit de transporte. En este caso, la cantidad de tierra que se desprende (D_f) por encima de la que se deposita viene dada por la siguiente ecuación:

$$D_f = Bu_s(T_c - T_a) \quad (58)$$

donde:

D_f = cantidad de suelo desprendido

u_s = velocidad de sedimentación

B = es un coeficiente de proporcionalidad, que tiene en cuenta la resistencia al corte del suelo (τ_s , medida con un medidor de campo a saturación) de la siguiente manera (Morgan *et al.*, 1998):

$$B = 0.79e^{-0.85\tau_s} \quad (59)$$

Cuando la ecuación 48 da valores negativos, entonces la sedimentación es dominante y $\beta = 1$ por definición.

Con respecto a los flujos concentrados y su transporte de sedimentos hay que decir que la erosión en surcos o canalillos se trata a menudo mediante el uso de la ecuación 48, equilibrando la erosión y la deposición en el lecho del surco con la entrada de la erosión de las zonas entre surcos (laminar).

Los temas de mayor interés para la erosión en cárcavas son como y donde se forman en un paisaje determinado, la rapidez con que se erosionan, y hasta qué punto de pendiente ascendente pueden retraerse. Su ubicación en el paisaje está determinada por la precipitación local (las áreas más secas requieren cuencas más grandes que las más húmedas), el área de contribución a la escorrentía, la pendiente media del valle, y la pendiente local en la cabecera de la cárcava.

Existe un umbral para el establecimiento de una cabecera de cárcava, que depende del área de la cuenca de drenaje (A) y la pendiente (S) de la cabecera de la cárcava, expresado según la relación:

$$S \geq aA^{-b} \quad (60)$$

donde:

S = es la pendiente local de la cabecera de la cárcava

A = (ha) es la zona de captación de la cabecera de la cárcava

$a \in [0,07; 0,11]$ en las tierras de cultivo, $a \approx 0,2$ en los pastizales (Poesen *et al.*, 1998)

$b \in [0,1; 0,8]$ a menudo ser inferior a 0,3

Las tasas de retracción de las cabeceras de cárcavas dependen de la cantidad de agua que drenan, es decir, que las cabeceras de cárcavas se retraen a una velocidad proporcional a la zona de captación (A). Se encontró la siguiente relación para la tasa de retracción de las cabeceras de cárcavas (G_r):

$$G_r = cA^\xi \quad (61)$$

donde:

G_r = es la tasa de retracción de la cabecera de la cárcava

A = (ha) es la zona de captación de la cabecera de la cárcava

c = es un coeficiente empírico que depende de las características locales (suelo, uso del suelo, la topografía, precipitación)

ξ = es un exponente que generalmente se halla cerca de 0.5

Por lo general, se establece un equilibrio local entre los procesos de erosión que hacen retraerse las paredes laterales y los que más socavan el lecho de la cárcava. Así se pueden establecer relaciones locales entre la anchura, la profundidad y la sección transversal de las cárcavas. Varios estudios

mostraron que surcos y cárcavas pueden caracterizarse por una ecuación que relacione la anchura del canal (w) con la descarga de escorrentía formativa del canal (Q). Torri *et al.* (2006) y Salvador-Sanchis *et al.* (2009) propusieron la siguiente ecuación en base a sus estudios:

$$w = \chi \left(\frac{Q}{Q_0} \right)^\alpha \quad (62)$$

donde:

w = es la anchura del canal

Q = es la descarga formativa

Q_0 = es una descarga

χ = es una longitud

α = varía con el ancho del canal y se calcula según:

$$\alpha = 0.534(1 - 0.354e^{-0.0255w}) \quad (63)$$

Una disminución de la inclinación de la pendiente a menudo corresponde a una disminución del desprendimiento y transporte por parte de la escorrentía, lo que provoca una disminución en la profundidad de la cárcava y eventualmente el final de la misma. También suele ocurrir en general cuando se pasa de un uso de suelo menos protector a uno que lo es más.

4.2. Modelado numérico

Como ya se citó anteriormente, en este estudio se pretendió la evaluación del proceso erosivo según un modelo que no se conoce hasta la fecha, haya sido utilizado previamente sobre suelos mexicanos, el modelo MPSIAC, con expectativas de obtener buenos y acordes resultados, ya que el uso relatado del mismo sobre otras áreas del mundo, así los ha obtenido en ambientes similares a la zona de estudio que nos ocupa. Así mismo para mayor seguridad y como método de comprobación y contraste, se realizó una segunda evaluación del mismo proceso y en relación a la misma base de datos empírica realizada durante el tiempo que abarca el estudio, a través del modelo RUSLE ya comprobado con anterioridad en muchos casos en la República Mexicana y en concreto usado en 2007 para estudios en varias subcuencas del estado de San Luis Potosí, ocupando dos (las subcuencas Tepetate y San Antonio) que abarcan también dos de las áreas de estudio relacionadas en este trabajo y que dan rangos de erosión hídrica actual, para aquel año de 2007, de categoría alta (50 - 200 T/ha/año) y de erosión hídrica potencial de categoría muy alta (>200 T/ha/año) en ambos casos (Loredo-Osti,2007) para las zonas de solapamiento con este estudio, de manera que tales datos sirven de apoyo y contraste para los resultados obtenidos en este trabajo.

4.2.1. Modelado del área de estudio con el modelo MPSIAC

El modelo MPSIAC ya fue descrito anteriormente en el apartado 2.5.5 del presente texto. En este punto vamos a realizar un breve recordatorio de la forma de la ecuación principal, para ir después revisando una a una la manera en que se abordó cada una de las ecuaciones de los factores que implementan el modelo. Así pues la fórmula general era la correspondiente a la ecuación 3:

$$Rating = Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_4 + Y_5 + Y_6 + Y_7 + Y_8 + Y_9 \quad (3)$$

donde:

Y_1 = es el factor de geología de la superficie

Y_6 = es el factor de la cobertura del suelo

Y_2 = es el factor del suelo (factor K de RUSLE),

Y_7 = es el factor de uso del suelo

Y_3 = es el factor del clima,

Y_8 = es el factor de la erosión superficial

Y_4 = es el factor de la escorrentía,

Y_9 = es el factor de la erosión en cárcavas

Y_5 = es el factor de la topografía,

- **Para el Factor Y_1 (geología superficial)** se realizaron las anotaciones correspondientes en las salidas a campo, teniendo en cuenta los datos aportados por la carta Geológico-minera F14A83 Tepetate. Se establecieron valores para cada una de las unidades geológicas presentes en las áreas de estudio teniendo en cuenta el tipo de roca, su dureza teórica, su estado de fracturación e intemperización, como se muestra en la Tabla 23.

Tabla 23. Evaluación de la geología superficial. El porcentaje parcial se refiere al porcentaje de la superficie en m² que cada unidad cubre en cada área. El valor del porcentaje parcial es el que se usó en la digitalización del modelo para cada unidad geológica. El valor final fue el usado para el desarrollo matemático del modelo. Fuente: elaboración propia.

AREA	UNIDAD	VALOR	%PARCIAL	%TOTAL	VAL_%PARC	VALOR FINAL
1 (MC)	Ignimbrita Cantera	2	100.00	100.00	2.00	2
2 (TP)	Aluvión Cuaternario	7	44.55	100.00	3.12	3.67
	Riolita San Miguelito	1	55.45		0.55	
3 (TSA)	Basalto la Placa	1	10.94	100.00	0.11	3.04
	Aluvión Cuaternario	7	28.64		2.01	
	Ignimbrita Cantera	2	29.66		0.59	
	Riolita Panalillo	3	1.36		0.04	
	Riolita San Miguelito	1	29.39		0.29	

En el *raster* para calcular el modelo digital se le asignó el campo de "valor" de la tabla de atributos de la capa creada en *ArcGis* para las unidades geológicas.

Para la ecuación matemática $Y_1 = X_1 = \text{Valor final de cada área que llamaremos A (2), B (3.67) y C (3.04)}$ sin hacer distinción entre las subáreas.

- **Para el factor Y_2 (factor suelo, Factor K RUSLE)** se usaron los valores calculados del Factor K a través del algoritmo *KUERYK1.4*, mejor descritos en el siguiente apartado 5.2.2, ya que para el cálculo matemático de este modelo se usaron los valores promediados por área y para la digitalización del mismo se usó la capa *raster* creada para el cálculo del modelo RUSLE, por lo que para conocer la metodología de cálculo se remite a ese apartado nombrado. Para la ecuación matemática se usó la ecuación $Y_2 = 16.67 * (\text{Factor } K_{A,B,C})$ que también fue calculada para cada área por eso los subíndices A, B, C en el factor K. Los resultados se resumen en el apartado 5 de la presente tesis, especialmente designado para ello.
- **El factor Y_3 (Clima)** es la cantidad de una lluvia de 6-horas en mm con un periodo de retorno de 2 años determinado por los datos de precipitación. La fórmula matemática es $Y_3 = 0.2X_3$ y para la variable X_3 se adoptaron los cálculos hechos en un estudio de 2002 para el control de las inundaciones del Valle de San Luis Potosí, que contemplaba las presas de San José y San Antonio, el cual en sus análisis de lluvias contenía el dato de 32.9 mm para una lluvia de 6 horas con un periodo de retorno de 2 años calculado a través de los datos de precipitación de la estación San Luis Potosí, de este modo al ser una de las estaciones consideradas en este estudio y ante la imposibilidad de realizar el cálculo para todas las demás consideradas se optó por tomar este valor como el promedio para todas las demás. Así pues $X_3 = 32.9$ mm para ser incluido en la ecuación. Al ser un valor estándar para todas las áreas de estudio, el cálculo del modelo en base digital se incluyó como un factor numérico dentro del algebra de mapas.
- **Para el factor Y_4 (escorrentía)** se calcularon los valores del volumen anual de escorrentía en mm multiplicada por 0.03 y del caudal máximo anual en m³/sec./km² multiplicado por 50 y después se realizó la suma con lo que se obtuvo la variable X_4 de la fórmula $Y_4 = 0.2X_4$. Para desarrollar este factor se usó el método de la "fórmula racional" desarrollado en el año de 1889, pero que por su sencillez todavía se sigue utilizando. La hipótesis fundamental del método postula que una lluvia constante y uniforme que cae sobre una cuenca de estudio, producirá un gasto de descarga, el cual alcanza su valor máximo, cuando todos los puntos de la cuenca están contribuyendo al mismo tiempo en el punto de concentración. La hipótesis se satisface para un lapso de tiempo, denominado tiempo de concentración (t_c), definido como el tiempo que tarda el agua en fluir desde el punto más alejado de la cuenca hasta el punto de aforo o de estudio. De este modo el gasto máximo, o caudal máximo anual para este estudio, se define con la expresión:

$$Q_m = 0.278CIA \quad (64)$$

donde:

Q_m = es el gasto máximo, en m³/s

C = es el coeficiente de escurrimiento

I = es la intensidad media de la lluvia para una duración igual al t_c de la cuenca, en mm/h

A = es el área de captación de la cuenca drenada, en km².

El coeficiente de escurrimiento es la variable menos precisa del método racional, ya que supone una relación fija entre la tasa de escurrimiento y la tasa de lluvias para la cuenca de drenaje, lo que es poco exacto ya que la proporción de lluvia total que alcanzará el punto de concentración depende de muchos factores como la permeabilidad, la pendiente, el almacenamiento superficial en depresiones, las características y condiciones del suelo, la vegetación, la proximidad del nivel freático, etc. Finalmente y generalizando, como se trata del caudal de descarga que llegará al punto más bajo o de salida de la cuenca de estudio se optó por tomar dos valores correspondientes a dos escenarios, extremo y conservador, en el primero, el extremo, se seleccionó un valor de 0.6 que representa que de toda la lluvia registrada el 60% es escurrimiento que alcanza el punto de aforo o concentración y para el segundo escenario, el conservador, se seleccionó un valor de 0.4.

Para estimar la intensidad media de la lluvia para una duración igual al t_c se realizó un método gráfico, creando una gráfica de precipitación-tiempo (en mm y horas respectivamente) a través de los valores de la lluvia de periodo de retorno de 2 años de la estación de San Luis Potosí, sobre la que se contrastó el valor obtenido del cálculo del tiempo de concentración, y allí donde corta con la curva de precipitación se halló el valor en mm de intensidad de la lluvia. Para calcular el tiempo de concentración, se usó el criterio más común en México, que es el propuesto por Kirpich:

$$t_c = 0.0003455 \left(\frac{L}{\sqrt{S}} \right)^{0.77} \quad (65)$$

donde:

t_c = es el tiempo de concentración sobre la superficie natural, en h

L = es la longitud del cauce principal, en m

S = es la pendiente media del cauce principal.

Después, para calcular la variable volumen anual de escurrimiento (V_{ae}) en mm., se multiplico el promedio de lluvia anual de cada área de estudio (Tabla 11, apartado 2.8, del presente texto) por el coeficiente de escurrimiento. Finalmente se realizaron las operaciones descritas ($X_4 = Q_m * 50$ y $V_{ae} * 0.03$) se sumaron y se introdujeron en la ecuación el factor $Y_4 = 0.2X_4$

- **Para el factor Y_5 (topografía)** se calculó el porcentaje de inclinación de la pendiente (variable X_5) en principio en base digital a través de la ruta del programa *ArcGis* siguiente:

Arctoolbox → *Spatial Analyst tools* → *Surface* → *Slope*

Introduciendo la opción "*PERCENT_RISE*" en el cuadro opcional "*Output measurement*" del cuadro de diálogo

Para la fórmula matemática de este factor hubo algo más de problema en el cálculo, ya que se tuvo que realizar la pendiente promedio de cada subárea de estudio, se utilizaron las pendientes promedio descritas en el apartado 3.3 del presente texto, calculados a través de relaciones lineales promediadas, obtenidas por medio del programa *Google earth*[®], que se detallan en la Tabla 24.

Tabla 24. Promedios generales de las pendientes de las áreas de estudio. Fuente: Elaboración propia

Área estudio	General 1	General 2	Subárea_01	Subárea_02
	%	%	%	%
MC	16,5	18,2	13,8	16,3
TP			11,9	9,8
TSA	7,0	18,4	6,2	10,1

Como el área de estudio TP son dos microcuencas que comparten parte aguas no se pudo realizar el promedio general de toda el área como ocurre en las otras dos áreas en las que ambas subáreas se encuentran, más o menos, sobre la misma ladera.

- **Para el factor Y_6 (cobertura del suelo)** descrito como el porcentaje de suelo desnudo, se usó el mapa de usos de suelo creado para calcular el Factor C del modelo RUSLE, del cual se calcularon las áreas para cada uso y se realizó la relación de porcentajes con respecto a la zona total de cada área de estudio. Los datos que alumbraron estas operaciones fueron los recogidos en la Tabla 25.

Tabla 25. Porcentajes de uso de suelo con respecto a su área de estudio. Fuente: elaboración propia

AREA ESTUDIO	AREA TOTAL (m ²)	USO DE SUELO	AREA USO (m ²)	%PARCIAL USO
1 (MC)	885132.54	Suelo desnudo	630622.94	71.25
		Matorral	92957.24	10.50
		Agrícola	6198.53	0.70
		Afloramiento Rocoso	155353.83	17.55
		TOTALES	885132.54	100.00
2 (TP)	3516098.37	Suelo desnudo	2410035.39	68.54
		Matorral	394842.64	11.23
		Herbáceo	358912.06	10.21
		Agrícola	313755.62	8.92
		Afloramiento Rocoso	38552.67	1.10
TOTALES	3516098.37	100.00		
3 (TSA)	6424671.07	Suelo desnudo	4743955.85	73.84
		Matorral	1428429.42	22.23
		Agrícola	252285.79	3.93
		TOTALES	6424671.07	100.00

La ecuación para el cálculo del factor es $Y_6=0.2X_6$, para X_6 se consideró como porcentaje de suelo desnudo, además del uso con esa nomenclatura, los afloramientos rocosos y el uso agrícola ya que al ser zona de cultivo de temporada, la mayoría del año la pasan sin ningún tipo de cobertura o menor del 10% y se pretendió calcular el escenario más desfavorable. Por otro lado en el uso de suelo Matorral entra las clases forestal, arbustiva y de matorral con las distintas densidades alta, baja y media e igualmente ocurre para el herbáceo.

- **Para el factor Y_7 (uso del suelo)** se debe calcular el porcentaje de cobertura de los cultivos o vegetación, lo que se realizó igual que en el punto anterior, a través del mapa de usos de suelo creado para calcular el Factor C del modelo RUSLE, la ecuación que atiende a este factor es $Y_7=20-0.2X_7$, y para X_7 se realizaron las mismas consideraciones (Tabla 25) que para X_6 por lo que el uso determinado como "agrícola" de la tabla 25 no puntuó para esta variable y solo contaron los uso "matorral" y "herbáceo", como realmente con cobertura vegetal.
- **Para el factor Y_8 (erosión superficial)** se toma en cuenta el factor de erosión superficial (SSF) determinado por los procedimientos descritos en el Bureau of Land Management, BLM, Manual 7317 (Clarck, 1980). La ecuación de cálculo es $Y_8=0.25X_8$, siendo la variable X_8 el SSF. El SSF (*Soil Surface Factor*) es un método de descripción de las condiciones de erosión presentes en un área a través de las observaciones del investigador en campo y de 7 subfactores, ponderados entre 0 y 14 excepto los subfactores 6 y 7 que se ponderan entre 0 y 15. Los subfactores son (1) movimiento de suelo, (2) camada o mantillo superficial, (3) fragmentos de roca superficial, (4) formación de pedestales, (5) patrones de flujo, (6) surcos o canalillos y (7) cárcavas. La suma de todos los subfactores, si están presentes es 100, por lo que el rango total de erosión es igual a la suma de los subfactores, si algún factor no está presente no contabiliza para el total y el rango total de erosión es la suma de los subfactores dividido el total parcial de factores que se encuentran en el área. Cada subfactor se subdivide en cinco rangos entre 0 y 14 ó 15 que

corresponden a las cinco clases de condiciones erosivas del modelo. En la Tabla 26 se puede observar las condiciones para evaluar cada subfactor.

- Para el factor Y_9 (erosión en cárcavas) la ecuación de cálculo es $Y_9=1.67X_9$, donde X_9 toma en cuenta la evaluación de las cárcavas (SSFg) del SSF asociadas a la variable X_8

Tabla 26. Subfactores del método SSF. Fuente: Modificado de Clark, 1980

MOV RECIENTES SUELO		MOV. MANTILLO SUELO		FRAG. ROCAS SUPERFICIE		GRADO PEDESTALES		
Clase	Descripción	Valor SSF	Descripción	Valor SSF	Descripción	Valor SSF	Descripción	Valor SSF
	La profundidad de los depósitos recientes alrededor obstáculos, o en microterrazas; y / o la profundidad de las zonas truncadas, es de:		El mantillo ha sido trasladado y depositado de nuevo contra los obstáculos, o retirado de la zona.		La profundidad de eliminación de suelo y/o de los depósitos recientes alrededor de los fragmentos es de:		Los pedestales son en su mayoría de menos de: () de alto // o menos frecuente que: () pedestales por cada 100 pies cuadrados	
Estable	entre 0 - 0.1 in. (0 a 2.5 mm).	0 / 3	Sin movimiento, o menos del 2 %	0 / 3	menos de 0.1 in. (2,5 mm)	0 / 2	0.1 in. (2.5 mm) // 1-2	0 / 3
Leve	entre 0.1 - 0.2 in. (2.5 a 5 mm).	5	Entre 2 y 10 %	6	entre 0.1 y 0.2 in. (2.5 a 5 mm)	5	0.1-0.3 in. (2,5 a 8 mm) // 2 a 5	6
Moderada	entre 0.2 - 0.4 in. (de 5 a 10 mm)	8	Entre el 10 y el 25 %	8	entre 0.2 y 0.4 in. (5 a 10 mm).	8	0.3-0.6 in. (8 a 15 mm) // 5 a 7	9
Crítica	entre 0.4 y 0.8 in. (10 a 20 mm).	11	Entre el 25 y el 50 %	11	entre 0.4 y 0.8 in. (10 a 20 mm).	11	0.6-1 in. (15 a 25 mm) // 7 a 10	11
Severa	>0.8 in. (>20 mm)	14	> 50 %	14	> 0.8 in. (20 mm)	14	>1 pulg. (25 mm) // más de 10	14
GRADO DESARROLLO PATRONES FLUJO			SURCOS		CÁRCAVAS			
Clase	Descripción	Valor SSF	Descripción	Valor SSF	Descripción	Valor SSF	Descripción	Valor SSF
	La superficie muestra evidencia reciente de translocación y deposición de suelo y mantillo		Los surcos son en su mayoría de () de profundidad // generalmente a intervalos ()		Las paredes y el lecho de la cárcava muestran erosión activa (no crece vegetación) a lo largo de su longitud () // las cárcavas constituyen entre () por ciento del área total.			
Estable	Ninguna, o menor de 2 %	0 / 3	menos de 0.5 in. (13 mm) // más de 10 pies	0 / 3	No hay cárcavas, o menos de 2 % con erosión activa // menos del 2 %	0 / 3		
Leve	Entre el 2 y el 10 %	6	0.5 a 1 in. (13 a 25 mm) // más de 10 pies	6	Entre 2 y 5 % // el 2 y el 5 %	6		
Moderada	Entre el 10 y el 25 %	9	1 a 1.5 in. (25 a 38 mm) // 10 pies	9	Entre 5 y 10 % // entre el 5 y el 10 %	9		
Crítica	Entre el 25 y el 50 %	12	de 1.5 a 3 in. (38 a 76 mm) // 5 a 10 pies	12	Entre 10 y 50 % // Entre 10 y 50 %	12		
Severa	> 50 %	15	3 a 6 in. (76 a 152 mm) // menos de 5 pies	14	> 50 % // > 50 %	15		

Finalmente se realiza la suma de todos los factores de cálculo según la ecuación 3

$$R = Rating = Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_4 + Y_5 + Y_6 + Y_7 + Y_8 + Y_9 \quad (3)$$

En el modelo digital se realiza la misma operación a través del *raster calculator* de *ArcGIS*, donde se van introduciendo las capas o los valores numéricos como si fuera una calculadora normal.

El resultado R se sustituye en la ecuación 2 para conocer la cantidad de erosión por unidad de superficie, también llamado rendimiento de sedimentos (S_y por sus siglas en inglés)

$$S_y = 18.60e^{0.036 Rating} \quad (2)$$

4.2.2. Modelado del área de estudio según el modelo RUSLE

El modelo RUSLE ya fue descrito con anterioridad en este texto. A modo de resumen los factores que integran la ecuación para el cálculo de la pérdida de suelo por erosión hídrica son los de la ecuación 1:

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

A es el cálculo de la pérdida de suelo por unidad de área (T/ha/año)

R es el factor de erosividad de la lluvia y escorrentía (MJmm/ha/año)

K es el factor de erodibilidad (T/ha/MJmm)

L es el factor longitud de la pendiente (adimensional)

S es el factor de inclinación de la pendiente (adimensional)

C es el factor de cultivo y manejo (adimensional)

P es el factor de práctica de protección y/o conservación (adimensional)

L y S suelen considerarse juntos como una unidad, aunque no cambian su nomenclatura, simplemente se les designa juntos LS como el factor topográfico.

El modelo fue calculado totalmente a través del programa SIG ArcGIS® v.9.3, cada uno de los factores fue calculado directamente en el programa o se realizó una interpolación de los datos empíricos para convertirlos en imagen (raster).

En el presente trabajo las consideraciones para cada factor fueron:

- **Para la erosividad de la lluvia (Factor R)** se colectaron los datos de las cuatro estaciones meteorológicas que abarcan la zona de influencia completa de las tres áreas de estudio, como ya se describió anteriormente.

Se realizó una tabla Excel con los datos que contemplaba una temporalidad 32 años, desde el año 1980 hasta el 2012, ya que en años anteriores se disponía de muy pocos datos de cálculo. Sobre estos datos se calculó el Índice de Fournier Modificado y el Índice de Erosividad EI_{30} según la metodología propuesta por Calzolari *et al*, 2001.

- **Índice de Fournier Modificado**
Arnoldus (1980) propuso una corrección del Índice de Fournier (IF) en que se consideran no sólo la precipitación mensual del mes más húmedo, sino también la del resto de los meses. Este índice modificado de Fournier (IFM) caracteriza la agresividad de la precipitación y se calcula de la siguiente forma:

$$IFM = \sum_{i=1}^{12} \frac{P_i^2}{P} \quad (66)$$

donde:

IFM = índice de Fournier modificado en mm

Pi = precipitación del mes i en mm.

P = precipitación total anual, en mm.

El IFM se calculó para cada año y luego se promedió el resultado de los 32 años seleccionados (Tabla 27).

Tabla 27. Clasificación del Índice de Fournier Modificado (IFM)

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

- **Índice de Erosividad de la Lluvia EI_{30} .**
El EI_{30} fue propuesto por Wischmeier y Smith (1965) como el mejor estimador de la erosividad de la lluvia calculándose como el producto de la energía cinética de la lluvia (E) por la intensidad máxima en 30 minutos continuos de lluvia (I_{30}), principalmente para un solo evento de precipitación.

La dificultad de obtener este tipo de datos, ya que no existen bases de datos que los contengan en esta forma, es la que dictaminó que se buscaran alternativas para lograr buenas correlaciones con cálculos basados en datos de precipitación total por evento, diarios, mensuales o anuales. De hecho para este estudio ante la dificultad de encontrar de datos de precipitación por evento, se optó por realizar el cálculo del índice en base a la precipitación máxima mensual, considerando este dato como la suma de todos los totales de los eventos del mes. Así la ecuación propuesta por Calzolari *et al*, 2001, estaba basada en la precipitación por evento, y con la modificación dada en este estudio queda:

$$EI_{30} = 0.11 \sum P_j^{1.85} \quad (67)$$

donde:

EI_{30} = índice de erosividad en MJmm/ha/hora

Pj = precipitación máxima del mes "j" en mm.

De este modo se calculó el índice para cada año y después se promedió el resultado de todos los años considerados para cada una de las estaciones meteorológicas (Tabla 28).

Tabla 28. Clasificación de rangos típicos de R anual

CLASE	R (MJ/ha*mm/hr)
Muy baja	<500
Baja	500-1000
Mediana	1000-3000
Alta	3000-6000
Muy alta	>6000

Los resultados del Factor R obtenidos se exponen en el apartado de la tesis expresamente designado para ello, y fueron utilizados para como base de interpolación para crear la capa *raster* que sirvió de cálculo al modelo.

- **Para la erodibilidad del suelo (Factor K)**, fue el factor que más trabajo conllevó, pues para su cálculo hubo que preparar todos los factores descritos en el apartado 4.5 del presente trabajo, necesarios para desarrollar el algoritmo del programa *KUERY1.4*. Además el cálculo se realizó en base al criterio vertical seguido en el muestreo de campo, por lo que para cada punto de muestreo se realizó el cálculo de cada una de las profundidades de muestreo que se poseía, consideradas cada una como una muestra. De esta manera se tuvieron en cuenta:
 - Los resultados de la granulometría de la fracción de finos (<2mm.), tras haber determinado las clases texturales de cada profundidad de muestreo (muestra)
 - El porcentaje de fragmentos rocosos extraído de los cálculos de la granulometría
 - Los porcentajes de materia orgánica de cada muestra
 - El Porcentaje de Sodio Intercambiable o ESP por sus siglas en inglés calculado a partir de la concentración de cationes intercambiables y la capacidad de intercambio catiónico, da una idea de la sodicidad del suelo
 - El tipo de clima presente en el área de estudio

Una vez se terminaron los análisis de laboratorio, se reunieron todos los datos en una tabla (Tabla 29), para facilitar la introducción de los datos al programa tal y como se muestra a continuación:

Tabla 29. Tabla de datos del Lote de muestras 01, muestreos de otoño a invierno. Fuente: elaboración propia

Muestra	%AF _{RK}	%M.O.	ESP	Arcilla	Limo	Arena	Textura
MC 01 A1	6.2061	1.3188	11.44	10	39	51	Franco
MC 01 A2	6.0821	0.8122	8.66	9	40	51	Franco
MC 01 A3	6.1393	0.7163	3.10	16	38	46	Franco
MC 01 B4	0.3204	1.9815	14.78	42.5	23	34.5	Arcilloso
MC 01 C1	13.0996	0.3881	4.30	8.5	13.5	78	Franco arenoso
TP 01 A1	8.1406	1.1497	5.65	11	31.5	57.5	Franco-arenoso
TP 01 A2	9.3269	0.7951	1.96	13	28	59	Franco-arenoso
TP 01 B6	2.9942	2.3495	22.13	2.5	12.5	85	Arenoso
TP 01 C2	23.2761	0.8523	1.96	15	29.5	55.5	Franco-arenoso
TP 01 D4	0.4786	2.2798	12.08	41.5	28.5	30	Arcilloso
TSA 01 A1	2.4857	2.2116	8.80	22.5	46	31.5	Franco
TSA 01 A3	3.0922	2.2916	1.61	23	35	42	Franco
TSA 01 B1	6.4590	2.5853	6.47	19.5	36.5	44	Franco
TSA 01 B3	2.6937	2.0425	1.34	20	42	38	Franco
TSA 01 B4	1.1905	3.6613	2.83	52.5	17	30.5	Arcilloso

Las consideraciones que se deben tener al introducir los datos para hacer funcionar el programa serían, introducir primeramente el tipo de clima y el contenido de fragmentos rocosos, así se

dividen en cuatro subgrupos (clima cálido con >10% y <10% de Frk y clima frío con >10% y <10% de Frk) después los datos texturales donde se introduce el % de arcillas y arenas (el de limos es automático), luego el porcentaje de materia orgánica y darle el nombre de la muestra a analizar, para finalmente cuando se hayan recibidos los resultados seleccionar el percentil de cálculo objetivo a través del porcentaje del ESP, para ESP>6 percentil máximo de cálculo, para ESP<6 percentil 50 de cálculo, de esta manera se tiene en consideración el escenario más desfavorable cuando un suelo está clasificado como sódico. A continuación se muestra la tabla de clasificación de los valores del factor K (Tabla 30).

Tabla 30. Clasificación en rangos del factor K

Valor	Clase
0 – 0.01	Bajo
0.01 – 0.02	Medio Bajo
0.02 – 0.03	Medio
0.03 – 0.04	Medio Alto
0.04 – 0.05	Alto
> 0.05	Muy Alto

Finalmente los resultados del Factor K se introdujeron en el programa SIG *ArcGIS*® v.9.3, para crear un *raster* por interpolación de los datos de las muestras, que serviría como factor de cálculo. En la tabla se introdujeron los datos de los puntos de muestreo con los valores promediados del factor K calculado y los datos del recuadro de interpolación a los que, los puntos 1 y 4 se les asignó un valor bajo de factor K por encontrarse más o menos sobre afloramientos del tipo rocoso y a los puntos 2 y 3 se les asignó el promedio de todos de entre todos los puntos de muestreo. La tabla final quedó así (Tabla 31):

Tabla 31. Datos de interpolación de los resultados del Factor K. Fuente: elaboración propia

Pto_muestreo	X	Y	PromxPto_muest
MC_01_A	287266	2445703	0.0303
MC_01_B	287312	2445718	0.0222
MC_01_C	287465	2445687	0.0061
TP_01_A	276410	2444615	0.0268
TP_01_B	276381	2444769	0.0352
TP_01_C	276245	2444903	0.0102
TP_01_D	276221	2444895	0.0225
TSA_01_A	277634	2443425	0.0221
TSA_01_B	277565	2443451	0.0196
MC_02_A	288168	2444916	0.0257
MC_02_B	288153	2444913	0.0204
TP_02_A	275816	2443962	0.0216
TSA_02_A	278115	2443012	0.0206
1_Izquierda arriba	273940	2446973	0.0100
2_Izquierda abajo	273920	2439853	0.0228
3_Derecha arriba	289240	2447419	0.0228
4_Derecha abajo	289357	2439830	0.0100

- **Para el Factor Topográfico (Factor LS)** se usó una metodología de cálculo digital propuesta por Giménez-Suarez, 2008, físicamente basada en su totalidad, por medio del modelo de elevación digital (DEM) creado para las áreas de estudio (punto 3.2.3.3 de este texto) con el programa SIG *ArcGIS*® v.9.3. A modo de resumen, para alcanzar el *raster* final con los valores del factor LS, y posteriormente integrarlo en *RUSLE*, se deben cumplir los siguientes pasos:
 - A. Creación del modelo de elevación digital (DEM, punto 3.2.3.3 de la presente tesis).
 - B. Cálculo del mapa de valores de inclinación de pendiente.
Los pasos para el cálculo son los siguientes:

Arctoolbox → Spatial Analyst tools → Surface → Slope

Dentro del módulo *Slope*, los parámetros obligatorios son:

- *INPUT RASTER*: DEM a utilizar para la determinación de la pendiente
 - *OUTPUT RASTER*: nombre y ubicación del *raster* de salida con los valores de pendiente.
- C. Cálculo del mapa de flujo acumulado (área de contribución aguas arriba, *A*).
Son dos las cantidades distribuidas que dependen de las direcciones de flujo, y estas son el área de contribución aguas arriba o *upslope contributing area*, *A*, y el área específica de captación o *specific catchment area*, *Ae*. El área aguas arriba, *A*, está definida como el área total de captación por encima de un punto, o este caso, de una celda *raster*.

Un algoritmo de flujo determina el camino sobre el cual, el flujo de salida desde una celda será distribuido a una o más celdas aguas abajo y por tanto la elección del algoritmo afectará la estimación del valor del área aguas arriba, así como de otros atributos topográficos. En ArcGIS, se cuenta con el algoritmo *D8*. Primero se deberá calcular la dirección del flujo para después calcular la acumulación del mismo. Los pasos de la ruta son:

Arctoolbox → Spatial Analyst tools → Hydrology → Flow Direction

Dentro del módulo *Flow Direction*, los parámetros obligatorios son:

- *INPUT SURFACE RASTER*: DEM a utilizar para la determinación de la dirección de flujo.
- *OUTPUT FLOW DIRECTION RASTER*: nombre y ubicación del *raster* de salida con los valores de dirección del flujo.

Arctoolbox → Spatial Analyst tools → Hydrology → Flow Accumulation

Dentro del módulo *Flow Accumulation*, los parámetros obligatorios son:

- *INPUT FLOW DIRECTION RASTER*: Introduciremos el *raster* calculado para la dirección de flujo.
 - *OUTPUT ACCUMULATION RASTER*: nombre y ubicación del *raster* de salida con los valores de acumulación del flujo.
- D. Cálculo del mapa del Área Específica, *Ae*.
El área específica de captación, *Ae*, está definida como el área de contribución aguas arriba por unidad de ancho de contorno, *b*, ($Ae=A/b$) y tiene unidades de longitud (por ej. $m^2/m = m$). El área específica de captación, *Ae*, es el parámetro que reemplaza a la longitud de pendiente, λ , en las ecuaciones del factor *L* de los modelos *RUSLE*.

En orden de calcular el área específica de captación, *Ae*, el área de contribución aguas arriba, *A*, tiene que ser dividida por la longitud efectiva de curva de nivel. Esto sería igual, a la longitud de la línea que atraviesa el centro de la celda y es perpendicular a la orientación (*aspect*), y es calculado de la siguiente manera:

$$D_{ij} = D(\sin a_{ij} + \cos a_{ij}) = Dx_{ij} \quad (68)$$

donde:

D_{ij} = longitud efectiva de curva de nivel

D = Resolución de celda en metros.

$X_{ij} = (\sin a_{ij} + \cos a_{ij})$

a_{ij} = dirección de la orientación para la celda del *raster* con coordenadas (i,j).

El área específica de captación, *Ae*, para una celda específica puede ser calculada como:

$$Ae_{ij} = \frac{A_{ij}}{D_{ij}} \quad (69)$$

donde:

Ae_{ij} = área específica de captación en la entrada de una celda *raster* con coordenadas (i,j)

A_{ij} = área de contribución aguas arriba en la entrada de una celda *raster* con coordenadas (i,j), es decir, el flujo acumulado.

D_{ij} = longitud efectiva de curva de nivel

Para la determinación del área específica de captación, *Ae*, no existe ningún módulo en especial, sino que es necesario utilizar lo que se conoce como *Raster Calculator* en ArcMap.

Así se escribirán las ecuaciones correspondientes para la determinación del raster de A_e .

Como será necesario la utilización de la capa *raster* de Orientación (*Aspect*), primero se deberá obtener esta a partir del DEM, para lo cual:

Arctoolbox → *Spatial* → *Analyst tools* → *Surface* → *Aspect*

Dentro del módulo *Aspect*, los parámetros obligatorios son:

- *INPUT RASTER*: DEM a utilizar para la determinación de la orientación.
- *OUTPUT RASTER*: nombre y ubicación del *raster* de salida con los valores de orientación en grados.

Lo siguiente será habilitar la barra de herramientas *Spatial Analyst*, y posteriormente, desplegar la pestaña del mismo nombre y seleccionar *Raster Calculator*. Como se ha explicado arriba, para llegar al cálculo del mapa del área específica (A_e) por la fórmula que entrafña, se deberá calcular primero la longitud efectiva de curva de nivel, para luego calcular A_e . Así pues, una vez abierto *Raster Calculator*, se comienza con la escritura de las ecuaciones:

Longitud efectiva de curva de nivel

La longitud efectiva de curva de nivel, se estimará a partir de la capa de Orientación (*Aspect*). Por tanto, en *Raster Calculator* se calcularán el seno y coseno, necesarios para la ecuación 56, a partir de la capa de orientación. Simplemente se selecciona el botón *sin* o *cos* según sea el caso y se selecciona la capa que contiene los datos de orientación (*Aspect*). Para la obtención de la capa *raster* con los valores de seno con *raster calculator*, se debe tener en cuenta que la función *sin* solo lee radianes. Como la capa de orientación está en grados, está debe ser previamente transformada a radianes, y por tanto ser dividida por el factor de conversión de radianes a grados de $180/\pi$, es decir, aproximadamente 57.2957, o lo que es lo mismo, multiplicarlo por 0.017453.

*Sin([Aspect] * 0.017453)* y luego *Evaluate*

*Cos([Aspect] * 0.017453)* y luego *Evaluate*

Para guardar este nuevo *raster*, se da botón derecho, sobre el nombre de este y a continuación elegir *Make Permanent...* Aquí nombrar y guardar el nuevo archivo

Por otro lado, teniendo en cuenta que los ángulos en la capa de orientación tienen valores que van de 0 a 360 grados, cuando se calculan el seno y coseno, resultará en capas que varían entre 1 y -1. Por tanto, ya que los valores de seno y coseno deben sumarse de acuerdo a la ecuación 2, para una correcta estimación de la longitud posterior, ambos *raster* deben tener valores positivos (0 a 1). La sentencia a escribir en *Raster Calculator*, tanto para la capa con los valores del seno como del coseno, será:

*con ([seno] < 0, [seno] * (- 1), [seno])*

*con ([coseno] < 0, [coseno] * (- 1), [coseno])*

El nombre entre los corchetes representa el nombre de la capa *raster* que contiene los valores de seno o coseno, según corresponda.

Una vez hecho esto, se suman las dos capas de seno y coseno (con valores solo positivos) y esta suma se multiplica por la resolución de celda (Ecuación 1), para obtener finalmente la longitud efectiva de curva de nivel. Un ejemplo de sentencia, con un tamaño de celda de 5 m, sería:

*5 * ([seno_pos] + [coseno_pos])*

Finalmente se obtendrá una capa, si la resolución es de 5 m, con valores que variarán entre 5 y 5,1421, es decir, las medidas en horizontal/vertical y diagonal de una celda *raster*, respectivamente (D_{ij} de la ecuación 56)

Estimación del área específica, Ae

De acuerdo a la ecuación 69, para la obtención del área específica de captación, A_e , son necesarias las capas raster del área de contribución aguas arriba (A) (Punto C, Acumulación de flujo), y la antes mencionada, longitud efectiva de curva de nivel (D_{ij}).

Para el cálculo, se abrirán en ArcMap, las capas de flujo acumulado y D_{ij} . La sentencia en *raster calculator* sería:

[Floww_acc] / [D_{ij}]

El nombre entre los corchetes representa el nombre de la capa *raster* que contiene los valores del Flujo acumulado y la longitud efectiva de curva de nivel según corresponda. El resultado de esta operación es el mapa final de Área Específica (A_e)

- **E. Cálculo del mapa del Factor LS para *RUSLE***

La ecuación para la estimación del factor LS en *RUSLE* es la siguiente:

$$LS = (m + 1) \left(\frac{A_e}{22.13} \right)^m \left(\frac{\sin \theta}{0.0896} \right)^n \quad (70)$$

donde:

A_e = es el área específica de captación,

θ = es la pendiente en grados

Los valores típicos para m están entre 0,4-0,6 y para n entre 1,0-1,3 dependiendo del tipo de flujo que predomina. Valores bajos de m y n deberían usarse para áreas donde prevalece flujo disperso, como aquellas cubiertas con vegetación, siendo lo habitual para esta situación $m=0,4$ y $n=1$. Los valores altos, en contrario, se utilizan sobre áreas con flujo más turbulento, generador de surcos y barrancos, como el área que nos ocupa en este estudio. Así pues los valores recomendados serían $m=0,6$ y $n=1,3$ (Mitasova et al., 1996 y 2001), que son los que se usaron para desarrollar el mapa final del Factor LS.

De acuerdo a la ecuación 70, las capas *raster* necesarias para la obtención del factor LS serán la del área específica, A_e , y la capa de pendientes, sobre la cual se calculará los valores de seno.

Para la obtención de la capa *raster* con los valores de seno con *raster calculator*, debido a lo ya mencionado con respecto a que la función *sin*, solo lee radianes, si la capa de pendientes está en grados debe ser previamente transformada a radianes, y por tanto ser dividida por el factor de conversión de radianes a grados de $180/\pi$, es decir, aproximadamente 57.2957, la sentencia en *raster calculator* sería:

$Sin([Slope] / 57.2957)$

Donde [Slope] es el nombre de la capa que contiene los valores de pendiente

Con la capa del seno y área específica, se podrá ahora calcular el factor LS de acuerdo a la ecuación 58. Donde la sentencia ejemplo, en *raster calculator*, sería:

$1.5 * Pow([aesp_5m] / 22.13, 0.6) * Pow([sin5] / 0.0896, 1.3)$

Donde [aesp_5m] es la capa que contiene el *raster* con el área específica y [sin5] la capa con los valores del seno de la pendiente, los valores de los exponentes m y n , corresponden a 0.6 y 1.3 respectivamente.

El resultado de esta operación sería el mapa final del Factor LS

- **Para el Factor de cobertura vegetal y manejo (Factor C)** también se usó una metodología de cálculo digital físicamente basada en su totalidad a partir de la digitalización y georreferenciación de imágenes actuales obtenidas del programa *Google Earth*® sobre las que se efectuó una clasificación supervisada. Para dicha clasificación los grupos de división se exponen en la Tabla 32.

Tabla 32. Clasificación y valoración de los diferentes grupos de protección del suelo con respecto a la cobertura vegetal. Fuente: Elaboración propia, los valores de cada grupo se extrajeron y modificaron de Ibañez-Asensio *et al.* (2012), teniendo en consideración las observaciones de campo

FACTOR C			
GRUPO	USO DE SUELO	CLASE	VALOR
1	Suelo desnudo, Agrícola Abandonado o con cobertura <10%		1
2	Suelo con cobertura	Matorral, Arbustivo o Forestal Alta densidad	0.08
		Matorral, Arbustivo o Forestal Media densidad	0.4
		Matorral, Arbustivo o Forestal Baja densidad	0.2
		Herbáceo	0.25
		Agrícola	0.8
3	Afloramientos Rocosos		1

La metodología seguida para obtener el *raster* con la clasificación supervisada fue:

- En el programa *Google Earth*® dentro de la carpeta "Mis Lugares" se creó una nueva de nombre "Factor C", pulsando el botón derecho del ratón sobre ella → Añadir → ruta (dibuja líneas) y así se crearon los polígonos (a base de línea) correspondientes a las áreas de estudio.
- En el interior de cada polígono se fueron creando del mismo modo las líneas que definían cada grupo y clase en que se dividió el Factor C, teniendo cuidado de que las líneas siempre cortasen unas con otras, para que luego los vacíos no generen problemas en *ArcGIS*® v.9.3.
- Cuando se tuvieron divididas por líneas, que se cruzaban formando polígonos, todas las áreas de estudio se seleccionó la carpeta creada "Factor C" y se guardó como archivo tipo Kml, según la ruta:

Archivo → Guardar → Guardar lugar como... → Tipo → Kml

- Cargar el archivo Kml al programa *ArcGIS*® v.9.3. y pasarlo de líneas que se cruzan a polígonos reales a través de la ruta

ArcToolBox → *Data Management Tools* → *Features* → *Feature to Polygon*

- Darle las coordenadas específicas de trabajo, en nuestro caso UTM.

ArcToolBox → *Data Management Tools* → *Projections and Transformations* → *Feature* → *Project*

- Botón derecho sobre la capa y seleccionar

Open attribute table → *Options* → *Add Field* → Nombre (Uso de suelo) → Tipo (texto)

Y aquí será donde incluiremos el grupo y la clase de cada polígono

Open attribute table → *Options* → *Add Field* → Nombre (Valor) → Tipo (double)

Para añadir aquí el valor de cada clase

- Para rellenar los campos, abrir el editor en *ArcMap* y seleccionar "*Start Editing*", después volver a abrir la tabla de atributos, seleccionar uno por uno cada elemento de la tabla, comprobar a qué grupo pertenece, rellenar el campo "Uso de Suelo" con su grupo y clase y darle el valor asignado a su clase en el campo "Valor", al finalizar cerrar el editor y guardar los cambios
- Finalmente convertir el *shape* a *raster* a través de la ruta:

ArcToolBox → *Conversion Tools* → *To Raster* → *Polygon to Raster*

En el campo que aparece en el submenú con *Value Field* introducir el campo "Valor" y muy importante darle el mismo tamaño de celda que el de los demás factores calculados, es decir 5m.

- **Para el Factor de protección (Factor P)** se siguió exactamente el mismo proceso que para calcular el Factor C realizando del mismo modo la clasificación supervisada sobre imágenes actuales obtenidas del programa *Google Earth*®, tan sólo se cambia el nombre del campo de la

tabla de atributos que corresponde al grupo y clase por "Uso de Protección" y el otro campo "Valor" es igual y claramente a cada grupo se le asigna su valor correspondiente según la Tabla 33:

Tabla 33. Clasificación y valoración de los diferentes grupos de protección del suelo con respecto a las prácticas de conservación. Fuente: Elaboración propia

FACTOR P			
GRUPO	USO DE PROTECCIÓN	CLASE	VALOR
1	Sin medidas de conservación		1
2	Con medidas de conservación		0.3
3	Agrícola (labranza-arado)	Sin orientación hacia la máxima pendiente	0.8
		Con orientación hacia la máxima pendiente	1

5. Síntesis de resultados y discusión

5.1. Resultados de parámetros físicos

5.1.1. Resistencia al corte superficial

Como ya fue mencionado se realizó *in situ* a través de un medidor de campo de la marca *Control* modelo 16-T0175/A (Figura 24). Los valores mostrados como "valor de campo" son la media de las medidas realizadas sobre los distintos niveles de profundidad de suelo según el criterio de verticalidad descrito, por norma se realizaban 10 medidas por cada punto de muestreo y nivel excepto en los casos en que resultaba imposible, pero al menos son 7-8 las medidas para cada nivel. La ecuación para el cálculo de la fuerza de resistencia al corte superficial, τ (en kPa) es la número (4) de este texto y con ella se obtuvieron los valores finales mostrados en la Tabla 34.

Tabla 34. Resultados de las pruebas de campo de resistencia al corte superficial. Fuente: elaboración propia

Área	Profundidad	Tipo Medidor	Valor campo	Valor Final Kpa=KN/m ²
MC_01	Nivel P1	Mínimo	1.02	21.95
	Nivel P1	Intermedio	2.10	9.87
	Nivel P2	Intermedio	0.73	3.45
	Nivel P3	Intermedio	0.56	2.63
	Nivel P4	VanTeGr Min	8.27	8.27
TP_01	Nivel P1	Penet Min	10.56	10.56
	Nivel P2	Intermedio	0.53	2.51
	Nivel P3	Intermedio	0.50	2.35
	Nivel P3	Intermedio	0.50	2.35
TSA_01	Nivel P1	Mínimo	1.20	25.91
	Nivel P2	Intermedio	1.22	5.72
	Nivel P1	Mínimo	1.36	29.37
	Nivel P2	Intermedio	0.99	4.65
	Nivel P4	Intermedio	1.08	5.08

Área	Profundidad	Tipo Medidor	Valor campo	Valor Final Kpa=KN/m ²
MC_02	Nivel P1	Mínimo	0.98	21.16
	Nivel P3	Intermedio	1.00	4.70
TP_02	Nivel P1	Mínimo	1.26	27.21
	Nivel P3	Grande	3.32	2.25
	Nivel P4	Grande	1.46	0.99
TSA_02	Nivel P1	Mínimo	1.78	38.44
	Nivel P3	Intermedio	0.78	3.67
	Nivel P4	Grande	1.54	1.04

La importancia de esta prueba reside en la influencia de este parámetro en las fases iniciales de la erosión, respecto al desprendimiento de las partículas, su arrastre y la formación de surcos.

5.1.2. Densidad real, aparente y porosidad

Los análisis de densidad se realizaron en laboratorio sobre las muestras recogidas en campo. Se realizaron todos los análisis por partida doble (duplicados) y luego se promedió los resultados de ambos experimentos (Tabla35).

Tabla 35. Resultados de los experimentos de densidad y cálculo de la porosidad. Fuente: elaboración propia

Muestra	δ_r (W/Vsc) = g/cm ³	δ_a (Pm-P/V)=g/cm ³	Porosidad ($\delta_r - \delta_a / \delta_r$)*100	Muestra	δ_r (W/Vsc) = g/cm ³	δ_a (Pm-P/V)=g/cm ³	Porosidad ($\delta_r - \delta_a / \delta_r$)*100
MC_01_A1	2.42	1.36	0.44	MC_02_A1	2.42	1.33	0.45
MC_01_A2	2.39	1.43	0.40	MC_02_A2	2.47	1.38	0.44
MC_01_A3	2.33	1.29	0.45	MC_02_A3	2.30	1.23	0.47
MC_01_B4	2.15	1.13	0.47	MC_02_B4	2.15	1.01	0.53
MC_01_C1	2.60	1.37	0.47				
TP_01_A1	2.33	1.38	0.41	TP_02_A1	2.28	1.24	0.46
TP_01_A2	2.30	1.35	0.42	TP_02_A3	2.18	1.14	0.48
TP_01_B6	2.13	1.18	0.45	TP_02_A4	2.11	1.03	0.51
TP_01_C2	2.23	1.27	0.43				
TP_01_D4	2.11	1.05	0.50				
TSA_01_A1	2.25	1.16	0.49	TSA_02_A1	2.33	1.19	0.49
TSA_01_A3	2.13	1.17	0.45	TSA_02_A2	2.26	1.16	0.49
TSA_01_B1	2.18	1.15	0.47	TSA_02_A3	2.21	1.14	0.48
TSA_01_B3	2.13	1.06	0.50	TSA_02_A4	2.11	1.05	0.50
TSA_01_B4	2.06	1.04	0.49				

La densidad es un parámetro importante que sirve de cálculo para la porosidad y es de uso en otros análisis como la granulometría (Tabla 36). La porosidad de un suelo es determinante en la capacidad

de infiltración y por ello juega un papel importante en el inicio de la escorrentía superficial, debido a su influencia directa sobre las fuerzas de capilaridad y el tiempo de encharcamiento (*ponding time*).

Tabla 36. Interpretación de los resultados de densidad aparente

Tipos de suelos		g/cm ³
Orgánicos y volcánicos		< 1
Minerales	Arcillosos	1.0 - 1.19
	Francos	1.2 - 1.32
	Arenosos	>1.32

La densidad aparente seca de un suelo da una indicación de la firmeza del suelo y con ella la resistencia que presentará a los implementos de labranza o raíces de las plantas cuando penetran en el suelo. A menor densidad aparente, mayor espacio poroso, es decir mayor porcentaje de porosidad y se trata de un suelo menos compacto. La densidad aparente es afectada por la porosidad e influye en la elasticidad, conductividad eléctrica, conductividad térmica, en la capacidad calorífica a volumen constante y en la dureza.

Como apreciamos en la Tabla 35 de resultados, la densidad aparente tiende a reducirse con la profundidad por lo que la porosidad total aumenta, lo que establece un escenario de macroporosidad en superficie y microporosidad en profundidad, lo que se correlaciona bien con el tipo de materiales registrados en general en todos los perfiles, que van de mayormente arenosos, pasando por francos hasta arcillosos en profundidad.

Por otro lado la densidad real sigue la misma tendencia de disminución con la profundidad, lo que nos hace presuponer la presencia de yesos u otras sales que suelen ser los que reducen esta medida, como veremos posteriormente en los resultados de cationes intercambiables, si se da un incremento considerable del catión calcio con la profundidad, sobre todo al pasar al horizonte arcillosos descrito, confirmándose también con los análisis de difracción donde aparecen los yesos como mayoritarios en las muestras de los horizontes arcillosos, de hecho se comprobó durante los análisis la presencia de concreciones salinas en los intersticios de los terrones y agregados de los horizontes arcillosos, que al mandar a analizar por difracción de rayos X el resultado fue claro, sulfatos de calcio hidratados como nuestra la Figura 27:

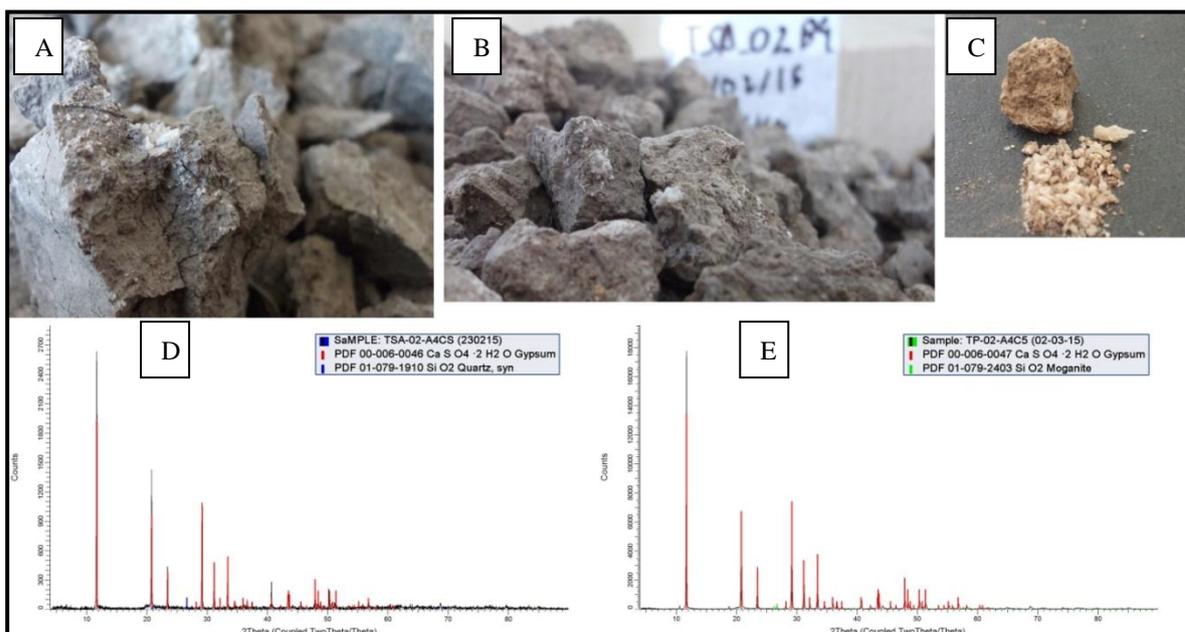


Figura 27. A, B y C muestran las concreciones salinas sobre los agregados de las muestras de los horizontes arcillosos. C y D son las gráficas resultado del análisis de DRX practicado a las concreciones salinas. Fuente: Elaboración propia

5.1.3. Granulometría

Los resultados de granulometría se obtuvieron por separado para la fracción gruesa y fina de cada muestra. Esto se debe a que a partir del tamaño de maya 4 ϕ (*Phi*) que corresponde a la base de las arenas (arenas muy finas), la realización del método del tamizado se hace muy laboriosa y de poca precisión, por lo que se optó por realizar el método Bouyoucos, para finalmente juntar los resultados obtenidos en una sola gráfica de mayor exactitud. Así pues, se muestra un ejemplo de las curvas granulométricas en la Figura 28, en las que aparecen las curvas calculadas para el subárea MC_01, mientras que todas las demás curvas calculadas, se incluirán en el Anexo 1. Relación de resultados de cálculo.

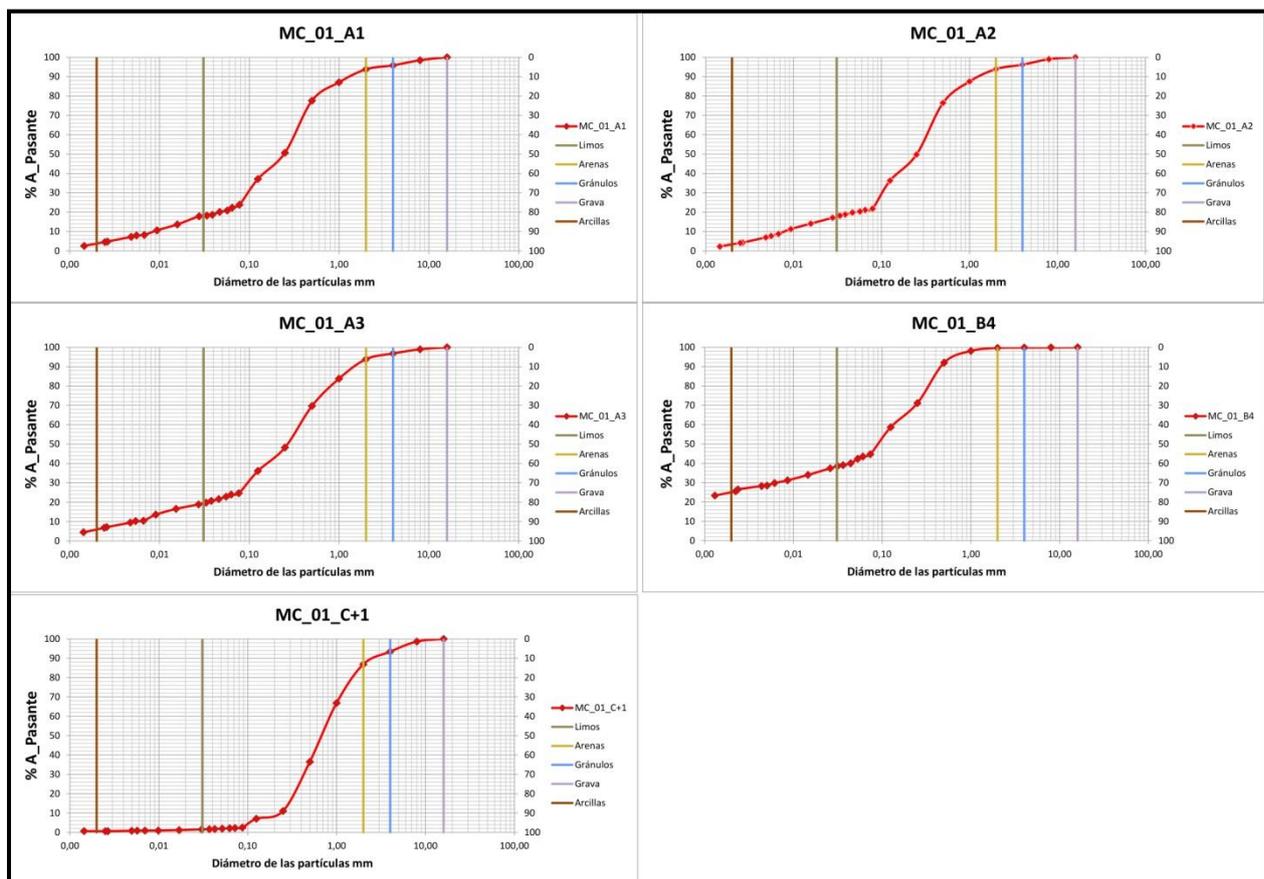


Figura 28. Curvas granulométricas de -4 a 13 ϕ (*Phi*), de la subárea de estudio MC_01. Las líneas de colores verticales representan los límites de corte entre cada fracción granulométrica, por lo que los tramos entre líneas representan los campos en que se expresa cada fracción

Como se observa en las gráficas de la Figura 28, son suelos con poca fracción gruesa mayor, es decir por encima de los gránulos (que van de 2 a 4 mm), con preponderancia de arenas y aumento en el contenido de finos, limos y arcillas, con la profundidad, ocurriendo un salto en el contenido de arcillas en el horizonte más profundo, los marcados con la terminación 4. Esto viene a confirmar la presunción del tipo de suelo descrito en el perfil tipo desarrollado en el punto 3.6 del presente texto, en el que se comentaba la posibilidad de migración de arcillas hacia el horizonte terminal y por lo que se clasificaba como Lixisol. En sí, estos resultados nos hablan de suelos de pobre estructura por su predominancia de arenas, de una permeabilidad alta, a poca profundidad y fácil lixiviación, si no fuera por la compactación superficial y el encostramiento que sufren, pero con capacidad de retención de agua en profundidad, por lo que en la zona media y baja pueden producirse con facilidad zonas de saturación de bases con concreciones salinas.

Por otro lado a través del ensayo granulométrico de la fracción fina (menor de 2mm) se determinaron las clases texturales, según el método del hidrómetro de Bouyoucos ya descrito anteriormente, las relaciones de los cálculos se mostrarán en el Anexo 1, por lo que el resumen de resultados se muestra en la Tabla 37. Los resultados del hidrómetro se graficaron en el triángulo de

texturas para conocer la clase textural de cada muestra. Nos encontramos con suelos principalmente Francos que pueden derivar hacia Franco-Arenoso dependiendo del área.

En el área 1 MC encontramos, como se puede observar en la Tabla 37, suelos Francos y Franco-arenosos en superficie, para finalmente pasar a textura Arcillosa en profundidad.

En el área 2 TP, encontramos principalmente suelos Franco-arenosos y arcilloso en profundidad, ya que la muestra TP_01_B6, son arenas que se encontraron bajo el tepetate o *hardpan* que hace de base para todos estos suelos.

El área 3 TSA son suelos básicamente Francos con algo más de contenido en arcillas por lo que el aumento de arcillas les proporciona una mayor cohesión y resistencia a la erosión, a no ser que se tratara de arcillas expansivas o dispersivas, que no es el caso.

A continuación se muestran las gráficas de los triángulos texturales (Figura 29), que se obtuvieron a través de una hoja *excel*, con los resultados de textura por subárea.

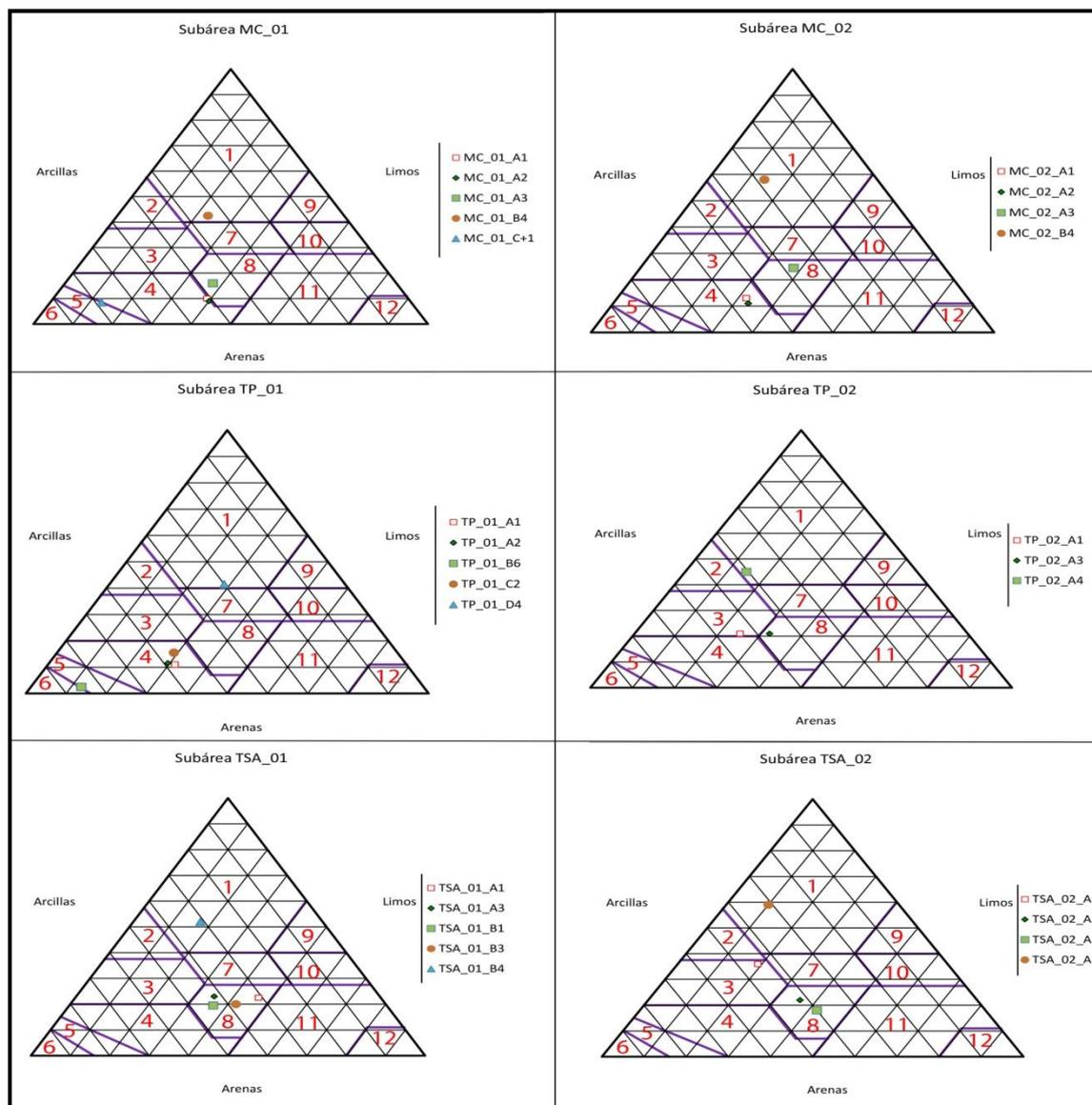


Figura 29. Triángulos de las clases texturales de los suelos de estudio. Las clases texturales son: 1 Arcilloso; 2 Arcillo-arenoso; 3 Franco-arcillo-arenoso; 4 Franco-arenoso; 5 Arenoso-franco; 6 Arenoso; 7 Franco-arcilloso; 8 Franco; 9 Arcillo-limoso; 10 Franco-arcillo-limoso; 11 Franco-limoso; 12 Limoso. En el Anexo 1 se exponen de manera más detallada. Fuente: Elaboración propia

En general, el bajo contenido de fragmentos rocosos, gránulos, gravas, etc., embebidos en la matriz del suelo, lo que mejora la estructura, el soporte y la formación de agregados, y la poca presencia de arcillas y como se verá, de materia orgánica en los perfiles superiores y medios del suelo hacen de estos suelos muy susceptibles a la erosión, si bien la presencia de costra superficial puede representar una primera

defensa ante los procesos erosivos, pero en cuanto se produce el fallo, rotura o agrietamiento, de esta capa superficial, las condiciones estructurales del suelo son aptas para que se desarrolle una erosión hídrica energética. A continuación se exponen los resultados que arrojaron los triángulos texturales en la Tabla 37.

Tabla 37. Resultados del ensayo del hidrómetro y clases texturales relacionadas. Fuente: Elaboración propia

Muestra	Arcilla	Limo	Arena	Textura
MC_01_A1	10	39	51	Franco
MC_01_A2	9	40	51	Franco
MC_01_A3	16	37.5	46.5	Franco
MC_01_B4	42.5	23	34.5	Arcilloso
MC_01_C+1	8.5	13	78.5	Arenoso-franco
TP_01_A1	11	31,5	57.5	Franco-arenoso
TP_01_A2	11.5	29.5	59	Franco-arenoso
TP_01_B6	2.5	12.5	85	Arenoso
TP_01_C2	15.5	29	55.5	Franco-arenoso
TP_01_D4	41.5	28.5	30	Arcilloso
TSA_01_A1	22.5	46.5	31	Franco
TSA_01_A3	23	35	42	Franco
TSA_01_B1	19.5	36.5	44	Franco
TSA_01_B3	20	42	38	Franco
TSA_01_B4	52	17	31	Arcilloso

Muestra	Arcilla	Limo	Arena	Textura
MC_02_A1	13	32	55	Franco Arenoso
MC_02_A2	11	33.5	55.5	Franco Arenoso
MC_02_A3	24.5	38	37.5	Franco
MC_02_B4	58	14	28	Arcilloso

Muestra	Arcilla	Limo	Arena	Textura
TP_02_A1	21	25	54	Franco Areno-arcilloso
TP_02_A3	21	32	47	Franco
TP_02_A4	45	14.5	40.5	Arcilloso

Muestra	Arcilla	Limo	Arena	Textura
TSA_02_A1	36	19	45	Franco Areno-arcilloso
TSA_02_A2	22	36	42	Franco
TSA_02_A3	18	42	40	Franco
TSA_02_A4	59	10	31	Arcilloso

5.1.4. Materia Orgánica

La materia orgánica presente en las unidades de suelo muestreadas se determinó por el método de "pérdida por calcinación" ya descrito anteriormente. Se realizó análisis doble por cada muestra y se repitió un tercero, si entre el primer experimento y el segundo la diferencia entre ambos superaba el 5%, seleccionando los dos valores más similares de entre los tres analizados, hecho que sólo ocurrió en dos ocasiones. Finalmente se promediaron los resultados de ambos experimentos (Tabla 38).

Tabla 38. Resultados de contenido de materia orgánica por muestra. Fuente: Elaboración propia

Muestra	Descripción y profundidad	% de M.O. Media
MC_01_A1	Costra Superficial	1.32
MC_01_A2	Subcostra-10 cm	0.81
MC_01_A3	10 - 25 cm	0.72
MC_01_B4	25 -50 cm horizonte Argílico	1.98
MC_01_C1	Depósito superficial de arenas	0.39
TP_01_A1	Costra Superficial	1.15
TP_01_A2	Subcostra-10 cm	0.80
TP_01_B6	Arena bajo tepetate	2.35
TP_01_C2	Subcostra-10 cm	0.85
TP_01_D4	25 -50 cm horizonte Argílico	2.28
TSA_01_A1	Costra Superficial	2.21
TSA_01_A3	10 - 25 cm	2.29
TSA_01_B1	Costra Superficial	2.59
TSA_01_B3	10 - 25 cm	2.04
TSA_01_B4	25 -50 cm horizonte Argílico	3.66

Muestra	Descripción y profundidad	% de M.O. Media
MC_02_A1	Costra Superficial	1.52
MC_02_A2	Subcostra-10 cm	0.99
MC_02_A3	10 - 25 cm	1.92
MC_02_B4	25 -50 cm horizonte Argílico	5.21

Muestra	Descripción y profundidad	% de M.O. Media
TP_02_A1	Costra Superficial	2.80
TP_02_A3	10 - 25 cm	2.93
TP_02_A4	25 -50 cm horizonte Argílico	4.17

Muestra	Descripción y profundidad	% de M.O. Media
TSA_02_A1	Costra Superficial	2.73
TSA_02_A2	Subcostra-10 cm	2.66
TSA_02_A3	10 - 25 cm	2.34
TSA_02_A4	25 -50 cm horizonte Argílico	5.89

La materia orgánica posee muchas características que influyen en el comportamiento del suelo frente a la erosión. Por un lado contribuye a la estabilidad de la estructura física de los agregados y partículas al posicionarse como agente cohesivo, por otro lado la presencia de materia orgánica influencia determinadas características químicas del suelo, como el pH, la capacidad de retención de agua, la presencia de cationes intercambiables, etc.

5.1.5. Dispersividad

El ensayo de dispersividad de Emerson Crumb (*Crumb Test*), como ya se citó, es un método gráfico semicuantitativo de fácil y rápido uso que permite identificar los problemas de materiales de fácil desagregación (*slaking*) y aquellos de características dispersivas directamente en campo, pero ahora es de frecuente uso en laboratorio. La clasificación de las imágenes responde a los siguientes grados:

- Grado 1: Ninguna reacción
- Grado 2: Reacción ligera
- Grado 3: reacción moderada
- Grado 4: reacción fuerte

A modo de ejemplo de los grados de clasificación del test de dispersividad se muestra la Figura 30.



Figura 30. Clasificación de los grados de dispersividad de suelos según el *Crumb Test*. Fuente: Imagen obtenida de internet a través de la página web: <http://fertsmart.dairyingfortomorrow.com.au/dairy-soils-and-fertiliser-manual/chapter-7-managing-limiting-soil-factors/7-2-slaking-and-dispersion/>

A continuación se muestra en la Figura 31 un ejemplo las imágenes del test realizado sobre las muestras del área de estudio 1 MC.

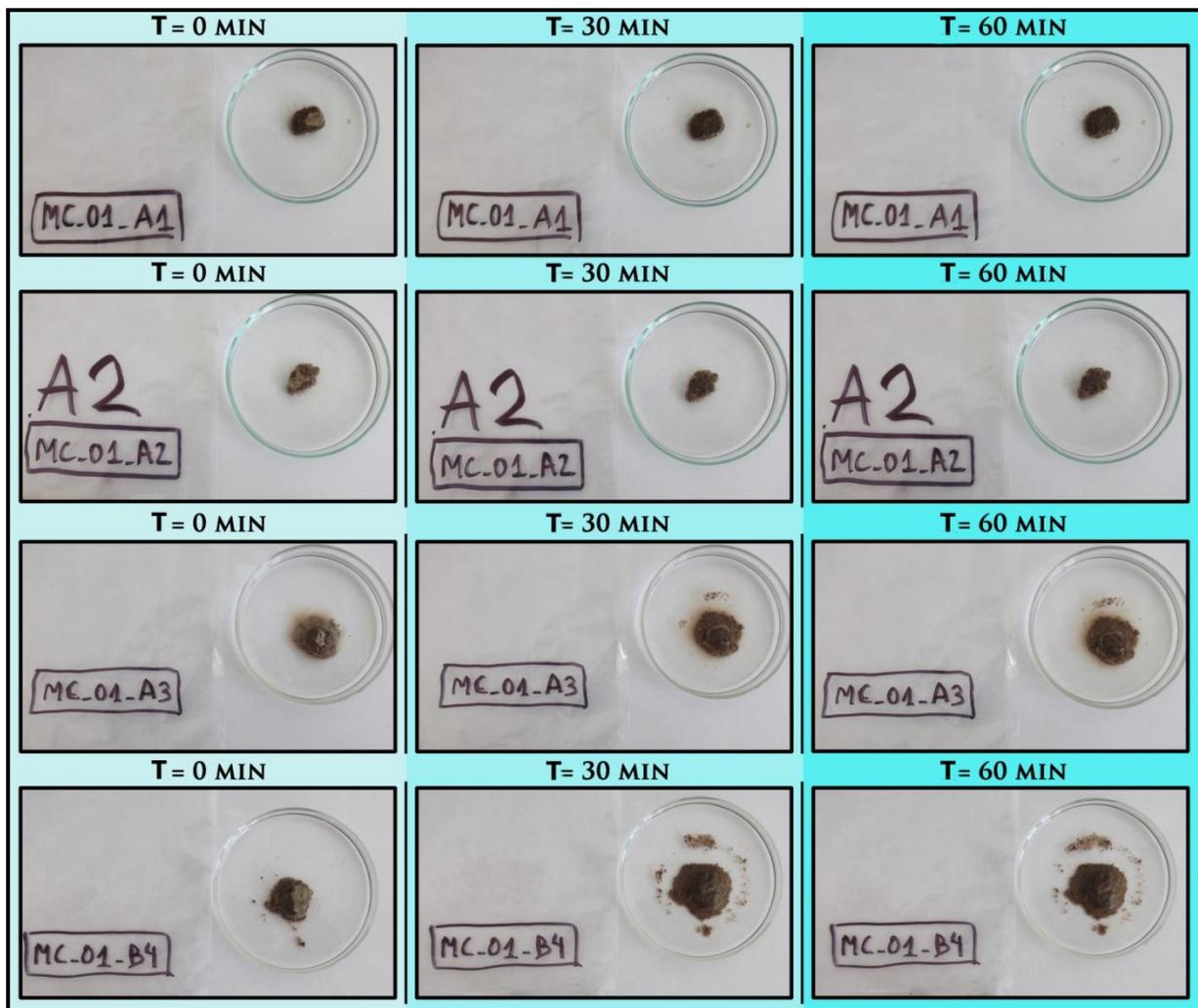


Figura 31. Resultados del test de dispersividad de las muestras del área de estudio 1 MC. Los resultados mostrados pertenecen a la prueba de dispersividad 1 realizada con agua desionizada, también se realizó una segunda prueba con una solución de Na OH 1 Normal. Fuente: Fotografías propias generadas expresamente para la realización de la prueba.

Los resultados observados de las fotografías son representativos de todas las muestras analizadas. En general las capas superficiales, profundidades 1 y 2 (0-10 cm), de los suelos de todas las subáreas de estudio mostraban un comportamiento de nula reacción, por lo que se emplazan en el Grado 1. Con respecto a la profundidad 3 (perfil medio del suelo) la reacción era mayoritariamente del Grado 2, tipo ligera, aunque en alguno de los casos se dio un grado un poco mayor de desestabilización del agregado. En la profundidad 4 (25 - 50 cm), el grado de inestabilidad era mayor y más rápido, en pocos segundos el terrón de suelo se descomponía, pero sin llegar a producir la característica nube de coloides en suspensión por lo que fue del Grado 3, de reacción tipo moderada. Para observar todos los resultados de esta prueba remitirse al Anexo 1.

5.2. Resultados de parámetros químicos

5.2.1. Capacidad de intercambio catiónico

La capacidad de intercambio catiónico (CIC) dio a luz los siguientes resultados (Tabla 39):

Tabla 39. Resultados de CIC a través del método As-13 con tiourea de plata (NOM-021). Fuente: Elaboración propia

MESA DE CONEJOS		TEPETATE LA PURÍSIMA		TEPETATE SAN ANTONIO	
SUBÁREA MC_01		SUBÁREA TP_01		SUBÁREA TSA_01	
MUESTRA	CIC	MUESTRA	CIC	MUESTRA	CIC
MC_01-A1	2.78	TP_01-A1	3.85	TSA_01-A1	1.52
MC_01-A2	2.77	TP_01-A2	0.97	TSA_01-A3	5.10
MC_01-A3	4.07	TP_01-B6	4.69	TSA_01-B1	4.81
MC_01-B4	18.41	TP_01-C2	5.33	TSA_01-B3	5.98
MC_01-C1	2.74	TP_01-D4	17.72	TSA_01-B4	18.66
mc-01 B5	10.57			TSA_01-C5	14.94
BT1	5.56	BT1	5.56	BT1	5.56
SUBÁREA MC_02		SUBÁREA TP_02		SUBÁREA TSA_02	
MUESTRA	CIC	MUESTRA	CIC	MUESTRA	CIC
MC -02 A1	2.89	TP-02-A1	6.70	TSA_02_A1	3.05
MC -02 A2	3.28	TP-02-A3	7.50	TSA_02_A2	7.00
MC -02 A3	6.16	TP-02-A4	23.29	TSA-02-A3	6.17
MC -02 B4	26.17			TSA_02_A4	22.82
BLANCO MC_02	5.88	BLANCO TP-02	5.19	BLANCO TSA_02	5.02

Sobre la Tabla 39 de resultados conviene comentar que, todas las muestras fueron procesadas en experimento doble para después promediar los resultados, realizándose un chequeo de comprobación de análisis sin etiqueta que dispuso que todos los resultados fueron coherentes.

Los rangos de interpretación de los resultados vienen dados por la Tabla 40:

Tabla 40. Rangos de valores de la CIC. Fuente: NOM-021-RECNAT

CLASE	CIC
Muy Alta	> 40
Alta	25 – 40
Media	15 – 25
Baja	5 – 15
Muy Baja	< 5

Como se observa en la Tabla 40, los suelos de estudio presentan una muy baja capacidad de intercambiar cationes, sobre todo en los estratos más superficiales, con tendencia a ir incrementando con la profundidad y con un gran salto en el valor al alcanzar el horizonte más profundo. Claramente el porcentaje de arcillas juega un papel importante en este hecho, ya que

debido a la condición electroquímica de las arcillas, éstas son afines a los cationes presentes en el suelo y por otro lado, también juega un papel importante el porcentaje de materia orgánica que, como pudimos observar anteriormente, desarrolla una tendencia muy similar a la de la CIC de incremento con la profundidad, y del mismo modo que las arcillas, de hecho están muy relacionadas, es afín al secuestro de cationes que juegan papeles importante en los procesos de formación de ácidos (húmicos, fúlvicos, húmica) y quelatos, los ácidos húmicos en sí mismos poseen una capacidad de intercambio superior al de las arcillas. De forma indirecta, la CIC, de lo que nos habla no es sólo de fertilidad como piensa la mayoría del mundo, en sí y debido a la asociación relatada con arcillas y materia orgánica, es un indicador de la estructura de un suelo, ya que se sus dos compañeros tienen principalmente la capacidad de formar agregados, de la permeabilidad el grado de intemperismo, el tipo de arcillas y la reserva de nutrientes, así como de muchas características relacionadas con los ciclos biogeoquímicos del suelo, fijación de carbono, nitrógeno etc., allá donde La CIC es baja, todas estas características citadas también lo son y al contrario, cuando es alta, los patrones de resistencia estructural y la fertilidad también lo son. La fertilidad con respecto a la erosión puede ser considerada un factor de resistencia al promover el desarrollo vegetativo, por todo lo que se ha comentado sobre el efecto que ejerce la vegetación, y no sólo es referido a la reducción de la agresividad climática y del impacto de la lluvia sobre el suelos por sus partes aéreas, sino también por el refuerzo estructural que suponen las raíces de las plantas.

5.2.2. Cationes intercambiables

Los cationes intercambiables también fueron analizados por doble análisis y luego se promediaron los resultados, para obtener los finales que muestra la Tabla 41.

Tabla 41. Resultados de los análisis de cationes intercambiables. Datos: Concentración promedio en mg/L. Fuente: Elaboración propia.

MUESTRA	Na	K	Ca	Mg	MUESTRA	Na	K	Ca	Mg
BT_1 lot1	0.83	0.14	0.42	0.15	Blanco_MC_02	0.72	0.10	0.30	0.14
MC_01_A1	0.66	1.85	3.11	0.26	MC_02_A1	1.32	5.92	12.52	0.89
MC_01_A2	1.34	5.46	7.62	1.17	MC_02_A2	0.77	4.01	16.01	0.74
MC_01_A3	0.74	10.74	8.31	3.91	MC_02_A3	8.43	13.33	10.41	11.47
MC_01_B4	22.69	29.23	59.94	23.72	MC_02_B4	29.06	25.57	332.25	26.90
MC_01_C1	0.69	2.79	9.72	1.37	MC_01_B5	6.62	14.28	34.06	13.49
TP_01_A1	0.90	6.35	8.06	1.06	Blanco_TP_02	0.62	0.07	0.22	0.13
TP_01_A2	0.81	6.80	25.34	3.85	TP_02_A1	1.34	9.29	31.10	2.80
TP_01_B6	6.15	8.24	7.93	4.07	TP_02_A3	1.84	10.45	36.52	5.44
TP_01_C2	0.84	6.67	26.38	4.06	TP_02_A4	13.09	27.68	266.10	21.38
TP_01_D4	19.97	33.30	88.63	12.76					
TSA_01_A1	2.91	10.94	14.75	3.59	Blanco_TSA_02	0.63	0.15	0.24	0.12
TSA_01_A3	1.07	7.80	43.60	5.66	TSA_02_A1	0.84	4.50	10.05	1.16
TSA_01_B1	1.07	3.92	9.77	1.02	TSA_02_A2	1.19	10.64	33.68	5.33
TSA_01_B3	0.92	9.25	46.14	4.78	TSA_02_A3	1.30	10.01	32.45	5.54
TSA_01_B4	4.16	18.25	87.30	16.94	TSA_02_A4	16.95	29.02	249.27	22.79
TSA_01_C5	3.86	18.04	76.98	12.37					

Como se observa en la Tabla 41 la concentración principal de cationes se da, como era de esperar, en el horizonte con mayor proporción de arcillas y materia orgánica, el horizonte 4. Esta alta concentración responde a las características ya citadas del perfil superior, cuyo contenido principal de arenas, su baja capacidad de intercambio y alta porosidad, su pobre estructura y estado de agregación, hacen que los elementos sean fácilmente lixiviados hacia la profundidad.

Cabe destacar la elevada presencia de calcio, sobre todo en las muestras tomadas de otoño a invierno que comenzaron en el mes de septiembre (mes en que el período de lluvias está en su culmen) y, por otro lado, los niveles medio-altos de sodio en algunos casos, ya que el sodio en elevada concentración representa un escenario poco deseable, tanto para la agricultura como para los procesos de erosión, debido a que es sinónimo de baja resistencia estructural. La evidencia de la gran presencia de calcio se manifiesta en las concreciones salinas de yesos, sobre todo en el

horizonte arcilloso, como se observa en la Figura 27, aunque pueden ser muchas las fuentes, como el cloruro de calcio o el bicarbonato de sodio. Por otro lado el sodio también es fácil encontrarlo en forma de sales, como bicarbonato, sulfato o cloruro de sodio, entre otros, pero también disuelto en el agua como catión libre, el problema asociado al sodio es que favorece la dispersión de los agregados del suelo, al contrario que el calcio y el magnesio que favorecen la floculación, por lo que es un enemigo de la cohesión de las arcillas.

5.2.3. Difracción de rayos X (DRX)

El análisis de difracción se realizó sobre dos fracciones distintas de cada muestra como ya fue descrito; a modo de ejemplo se muestran los resultados obtenidos para la subárea MC_01, los demás resultados estarán disponibles para su consulta en el Anexo 1.

Los minerales mayoritarios presentes en esta subárea, considerada representativa de las demás, son principalmente cuarzo y sus polimorfos (tridimita, cristobalita), plagioclasas de la serie continua (albita, anortita y sus promedios), ortoclasas, sanidinos y microclinas representando a los feldespatos, teniendo esta última características cementantes, y micas (biotita, muscovita) en superficie con la aparición de algunos minerales arcillosos según aumenta la profundidad contando con caolinitas y cloritas (Figura 32). En sí, concuerdan bien con los productos de intemperización de las unidades geológicas aflorantes descritas en el área, en comparativa con los resultados de Torres-Hernández *et al.*, 2014, que presentan según la norma CIPW, para el domo Cerro Grande (SSM) altos niveles de cuarzo (*qz*) y feldespatos (*or, ab, an*) y en menor proporción óxidos de hierro y apatita.

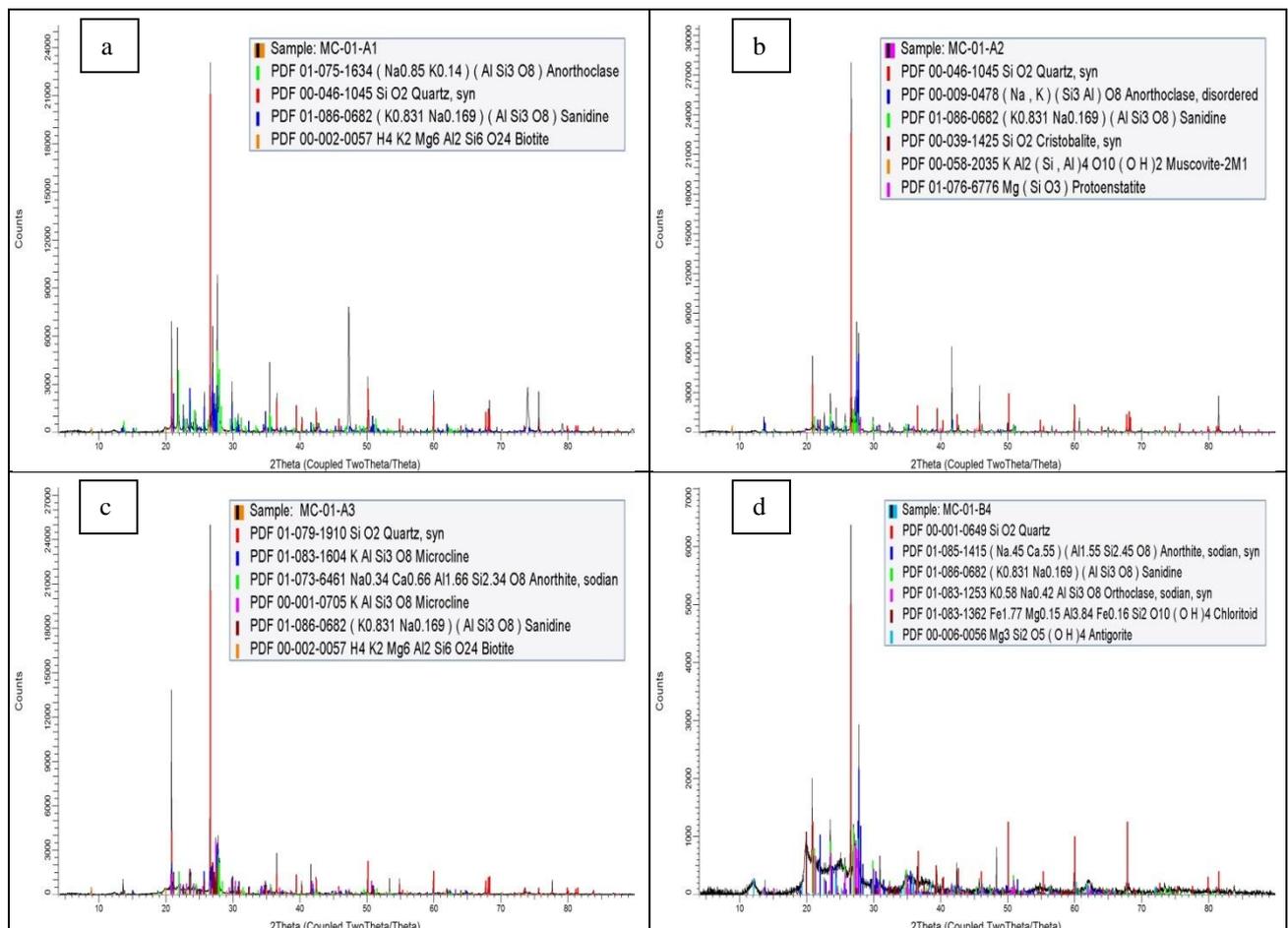


Figura 32. Difractogramas obtenidos por DRX sobre la fracción completa del suelo. Se muestran las gráficas pertenecientes al área de estudio MC correspondientes al lote 01 muestreos de primavera-verano; (a) Costra superficial; (b) Subcostra (0-10 cm); (c) Perfil medio del suelo (10-25/45 cm); (d) Horizonte arcilloso (25/45-50/80 cm)

Para intentar reconocer mejor el tipo de arcillas presentes en los suelos, se realizó un segundo análisis de DRX tomando una alícuota del sobrenadante de la prueba del hidrómetro tras 24 horas de reposo y los resultados se muestran en la Figura 33, a continuación.

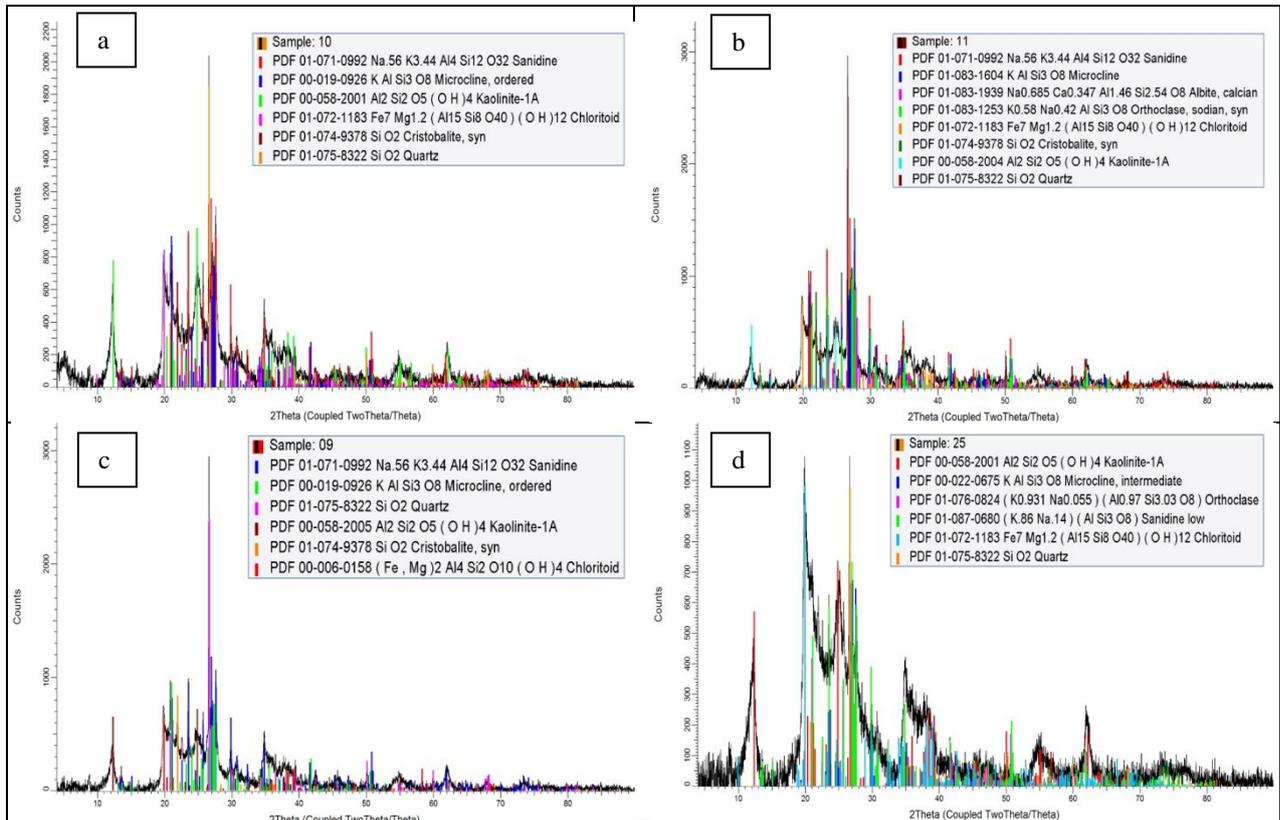


Figura 33. Difractogramas obtenidos por DRX para la fracción de arcillas. Se muestran las gráficas pertenecientes al área de estudio MC correspondientes al lote 01 muestreos de primavera-verano; (a) Costra superficial; (b) Subcostra (0-10 cm); (c) Perfil medio del suelo (10-25/45 cm); (d) Horizonte arcilloso (25/45-50/80 cm)

Las muestras aquí marcadas como 10, 11, 09 y 25 son las mismas (correspondientes al grupo MC_01), que las representadas en la figura anterior respectivamente. Las arcillas que se detectaron en todas las muestras son la caolinita y el cloritoide, excepto en la muestra 05 (TSA_02_A4) en la que sólo apareció caolinita, en las 25 muestras restantes se detectaron ambas arcillas. Por otro lado cabe comentar que en 13 muestras también se detectaron cronstedita (MC_02_A3; TP_01_D4; TSA_01_A3 y B1; TSA_02_A1 y A2) y antigorita (TP_01_A1, B6, C2 y D4; TP_02_A1 y A3; TSA_01_B1, B3 y B4) del grupo de la serpiente.

5.2.4. pH

Los resultados de pH se muestran en la tabla 43, nos hablan de una tendencia a su incremento con la profundidad hasta niveles neutros (Tabla 42), por lo que el perfil medio y la superficie muestran condición de ligeramente ácidos a ácidos fuertes, muy fuertes y en un caso en el límite de extremo (MC_01_A2), según la clasificación USDA (Tabla 43).

Tabla 42. Resultados del análisis de pH Fuente: Elaboración propia

Muestra	pH	Muestra	pH
MC_01_A1	4.70	MC_02_A1	4.59
MC_01_A2	4.44	MC_02_A2	6.11
MC_01_A3	5.77	MC_02_A3	5.32
MC_01_B4	7.03	MC_02_B4	6.68
MC_01_C1	5.44		
TP_01_A1	4.62	TP_02_A1	5.54
TP_01_A2	6.51	TP_02_A3	6.44
TP_01_B6	5.02	TP_02_A4	6.69
TP_01_C2	6.75		
TP_01_D4	7.68		
TSA_01_A1	4.42	TSA_02_A1	4.67
TSA_01_A3	6.22	TSA_02_A2	6.07
TSA_01_B1	5.47	TSA_02_A3	6.77
TSA_01_B3	6.32	TSA_02_A4	6.55
TSA_01_B4	6.83		

Tabla 43. Clasificación del pH en los suelos. Fuente: USDA "Natural Resources Conservation Service"

Denominación	Rango de pH
Ultra ácido	< 3.5
Ácido extremo	3.5–4.4
Ácido muy fuerte	4.5–5.0
Ácido fuerte	5.1–5.5
Moderadamente ácido	5.6–6.0
Ligeramente ácido	6.1–6.5
Neutro	6.6–7.3
Ligeramente alcalino	7.4–7.8
Moderadamente alcalino	7.9–8.4
Alcalino fuerte	8.5–9.0
Alcalino muy fuerte	> 9.0

El pH del suelo es considerado como una de las principales variables en los suelos, ya que controla muchos procesos químicos que en éste tienen lugar. Afecta específicamente la disponibilidad de los nutrientes de las plantas, mediante el control de las formas químicas de los nutrientes. Las interrelaciones son complejas, por ejemplo y para seguir con el tema del sodio, la dispersividad y la relación con la debilidad estructural, para una misma sodicidad dada, a mayores niveles de pH (más básico), mayores son los problemas de dispersividad y de falla estructural; ocurre que nuestros mayores niveles de sodio están en el horizonte arcilloso que también es el de mayor valor de pH, por lo que esta sinergia, puede ser un factor determinante en el proceso de erosión del horizonte arcilloso al quedar descubierto.

5.2.5. Conductividad

La conductividad eléctrica es una medida de la capacidad del suelo o, más bien, de la fase acuosa del suelo, para transportar la corriente eléctrica, lo que da una idea clara de la salinidad de los suelos, ya que a mayor concentración de sales, mayor conductividad. En este estudio, la conductividad presentó una gran variabilidad de una muestra a otra (Tabla 45).

Tabla 44. Resultados de la prueba de conductividad. Fuente: Elaboración propia

Conductividad Eléctrica (1:5)				Conductividad Eléctrica (1:5)			
Muestra	Lectura (µS/cm)	CE _{1:5} (dS/m)	Tª (°C)	Muestra	Lectura (µS/cm)	CE _{1:5} (dS/m)	Tª °C
MC_01_A1	28.4	0.0284	25	MC_02_A1	135.25	0.1353	25
MC_01_A2	75.15	0.0752	25	MC_02_A2	32.85	0.0329	25
MC_01_A3	34.25	0.0343	25	MC_02_A3	468.5	0.4685	25
MC_01_B4	465	0.4650	25	MC_02_B4	1253	1.2530	25
MC_01_C1	22.4	0.0224	25				
TP_01_A1	26.45	0.0265	25	TP_02_A1	95.8	0.0958	25
TP_01_A2	27.15	0.0272	25	TP_02_A3	56.65	0.0567	25
TP_01_B6	75.85	0.0759	25	TP_02_A4	1056	1.0560	25
TP_01_C2	34.1	0.0341	25				
TP_01_D4	258	0.2580	25				
TSA_01_A1	192.75	0.1928	25	TSA_02_A1	37.95	0.0379	25
TSA_01_A3	29.95	0.0299	25	TSA_02_A2	34.25	0.0343	25
TSA_01_B1	28.4	0.0284	25	TSA_02_A3	51.4	0.0514	25
TSA_01_B3	37.3	0.0373	25	TSA_02_A4	1268.5	1.2685	25
TSA_01_B4	143	0.1430	25				

La clasificación de los rangos para su interpretación se muestra en la Tabla 46.

Tabla 45. Clasificación de la conductividad eléctrica

CE _{1:5}	Clasificación
Menor de 0.35	No salino
0.35 - 0.65	Ligeramente salino
0.65 - 1.15	Salino
> 1.15	Muy salino

Como se puede observar, los problemas de salinidad denotados por la conductividad de las muestras (Tabla 44) se centran en el horizonte arcilloso que se categoriza de muy salino en general, acompañado por el perfil medio de la subárea MC_2, que se posiciona como salino. En las demás muestras, las que corresponden a las capas superficiales no alcanzan a ser salinos, lo que nos confirma la lixiviación de cationes hacia horizontes profundos. Los datos obtenidos son consistentes con, y confirman, lo comentado en cuanto a los resultados de CIC y cationes intercambiables, el pH, la materia orgánica y la desestabilización de las fuerzas estructurales.

5.3. Índices de cálculo

5.3.1. Porcentaje de sodio intercambiable (ESP)

Se calculó a partir de los resultados de concentración de cationes, ya que se fundamenta en la definición de ser la proporción de sodio intercambiable con respecto a la suma de los demás cationes intercambiables. La ecuación fue:

$$ESP = \frac{[Na^+] * 100}{[Ca^{2+}] + [Mg^{2+}] + [Na^+] + [K^+]} = cmol(+)/Kg \quad (71)$$

Los resultados obtenidos fueron (Tabla 47):

Tabla 46. Resultados de los cálculos del porcentaje de sodio intercambiable (ESP).

Muestra	Na	K	Ca	Mg	E.S.P.
	cmol(+)/Kg	cmol(+)/Kg	cmol(+)/Kg	cmol(+)/Kg	%
MC_01_A1	0.0029	0.0047	0.0155	0.0021	11.4369
MC_01_A2	0.0059	0.0140	0.0380	0.0097	8.6646
MC_01_A3	0.0032	0.0275	0.0415	0.0322	3.0961
MC_01_B4	0.0987	0.0748	0.2991	0.1952	14.7768
MC_01_C1	0.0030	0.0071	0.0485	0.0113	4.2986
TP_01_A1	0.0039	0.0162	0.0402	0.0087	5.6451
TP_01_A2	0.0035	0.0174	0.1264	0.0317	1.9606
TP_01_B6	0.0268	0.0211	0.0395	0.0335	22.1340
TP_01_C2	0.0036	0.0170	0.1316	0.0334	1.9600
TP_01_D4	0.0869	0.0852	0.4423	0.1050	12.0772
TSA_01_A1	0.0126	0.0280	0.0736	0.0295	8.7967
TSA_01_A3	0.0046	0.0200	0.2175	0.0466	1.6095
TSA_01_B1	0.0046	0.0100	0.0488	0.0084	6.4662
TSA_01_B3	0.0040	0.0236	0.2303	0.0393	1.3431
TSA_01_B4	0.0181	0.0467	0.4356	0.1394	2.8306
TSA_01_C5	0.0168	0.0461	0.3841	0.1018	3.0569

Muestra	Na	K	Ca	Mg	E.S.P.
	cmol(+)/Kg	cmol(+)/Kg	cmol(+)/Kg	cmol(+)/Kg	%
MC_02_A1	0.0057	0.0151	0.0625	0.0073	6.3309
MC_02_A2	0.0033	0.0103	0.0799	0.0061	3.3634
MC_02_A3	0.0367	0.0341	0.0519	0.0944	16.8933
MC_02_B4	0.1264	0.0654	1.6579	0.2214	6.1022
MC_01_B5	0.0288	0.0365	0.1700	0.1110	8.3150
TP_02_A1	0.0058	0.0237	0.1552	0.0230	2.8013
TP_02_A3	0.0080	0.0267	0.1822	0.0447	3.0564
TP_02_A4	0.0569	0.0708	1.3278	0.1759	3.4895

TSA_02_A1	0.0036	0.0115	0.0502	0.0095	4.8697
TSA_02_A2	0.0052	0.0272	0.1681	0.0438	2.1106
TSA_02_A3	0.0057	0.0256	0.1619	0.0456	2.3698
TSA_02_A4	0.0737	0.0742	1.2439	0.1876	4.6674

El ESP se empieza a considerar como indicador de suelos con problemas estructurales a partir de un umbral del 6% (van de Graaff y Patterson, 2001), siempre se debe considerar este dato como un valor no absoluto, por las muchísimas interrelaciones entre los factores descritos anteriormente (conductividad, CIC, pH, concentración de cationes, materia orgánica), pero para hacer una generalización se clasifica como sódico si supera al 6% y altamente sódico por encima del 15%. En este estudio se usó como factor de selección del percentil de cálculo arrojado por el algoritmo *KUERY1.4* para la evaluación de la erodibilidad, el valor de ESP, utilizando este umbral del 6% para seleccionar: (1) el percentil 50 cuando era menor a dicho umbral y (2) el percentil máximo cuando era superior al umbral del 6%.

A la luz de los resultados observamos que varias de las profundidades de muestreo poseen porcentajes considerados altamente sódicos, sin seguir una tendencia concreta, esto es debido a la propia naturaleza del índice al ser una relación entre cationes; así pues es que encontramos valores bajos en los muestreos de otoño-invierno (lote 02) excepto en un par de casos (MC_02_A3 y A4) ya que la presencia en cantidad de otros cationes reduce este índice y ya vimos anteriormente que en esta época el rango de concentración de calcio se disparaba. En general por los datos obtenidos se observa que los problemas suelen aparecer en la costra superficial y en horizontes profundos,

dejando la fase media con menos problemas de salinidad, debido posiblemente a la lixiviación de cationes que suele sufrir esta zona, como ya se comentó anteriormente.

5.3.2. Índice de estabilidad electroquímica (ESI)

Este índice ha sido sugerido como una mejor medida del comportamiento dispersivo de los suelos. Es en realidad una relación entre la salinidad y la sodicidad. Su comportamiento es tal que para una sodicidad dada (ESP) al disminuir la conductividad eléctrica (CE) se produce un aumento también de la dispersividad, de esta manera aunque haya un valor de ESP menor del umbral del 6% puede darse dispersividad, si la CE disminuye drásticamente y el sodio prevalece. Del mismo modo que para el ESP se establece un valor crítico por el cual aquellos suelos que presenten un $ESI \leq 0.05$ se consideran suelos problemáticos (McKenzie, 1998) con respecto a la dispersividad y a la salinidad. Así pues, la ecuación que se usó para calcular este índice fue:

$$ESI = \frac{CE \left(\frac{dS}{m} \right)}{ESP \left(\frac{cmol[+]}{Kg} \right)} \quad (72)$$

Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 47:

Tabla 47. Resultados de cálculo el índice de estabilidad electroquímica (ESI)

Muestra	CE1:5 (dS/m)	ESP	ESI	Muestra	CE _{1:5} (dS/m)	E.S.P.	ESI
MC_01_A1	0.0284	11.44	0.0124	MC_02_A1	0.1353	6.33	0.0214
MC_01_A2	0.0752	8.66	0.0087	MC_02_A2	0.0329	3.36	0.0098
MC_01_A3	0.0343	3.10	0.0111	MC_02_A3	0.4685	16.89	0.0277
MC_01_B4	0.4650	14.78	0.0315	MC_02_B4	1.2530	6.10	0.2053
MC_01_C1	0.0224	4.30	0.0052				
TP_01_A1	0.0265	5.65	0.0047	TP_02_A1	0.0958	2.80	0.0342
TP_01_A2	0.0272	1.96	0.0138	TP_02_A3	0.0567	3.06	0.0185
TP_01_B6	0.0759	22.13	0.0034	TP_02_A4	1.0560	3.49	0.3026
TP_01_C2	0.0341	1.96	0.0174				
TP_01_D4	0.2580	12.08	0.0214				
TSA_01_A1	0.1928	8.80	0.0219	TSA_02_A1	0.0379	4.87	0.0078
TSA_01_A3	0.0299	1.61	0.0186	TSA_02_A2	0.0343	2.11	0.0162
TSA_01_B1	0.0284	6.47	0.0044	TSA_02_A3	0.0514	2.37	0.0217
TSA_01_B3	0.0373	1.34	0.0278	TSA_02_A4	1.2685	4.67	0.2718
TSA_01_B4	0.1430	2.83	0.0505				

Observamos que sólo en el horizonte arcilloso se constata la superación del umbral de 0.05 y en los muestreos de otoño-invierno tras el periodo de lluvias; en el período del año, diríamos, más seco, con los muestreos de primavera-verano, tan solo uno de los horizontes alcanzó justo el umbral. Esto demuestra que además de todo lo expuesto en cuanto a conductividad eléctrica, salinidad, sodicidad, etc., la estacionalidad y agresividad de las lluvias también tiene un papel significante en las características químicas de estos suelos de estudio.

5.3.3. Porcentaje de fragmentos rocosos

Este porcentaje se determinó para las dos fracciones consideradas anteriormente citadas, fragmentos rocosos embebidos en el suelo y los parcialmente embebidos o depositados sobre la superficie. Estos últimos se estimaron a partir de las observaciones directas en campo y las fotografías realizadas en cada área de estudio, llegando a la conclusión que no representaban una cantidad superior al 10%, claramente habiendo zonas muy próximas a este nivel y otras que no presentaban cantidades mayores al 3-4 %. El porcentaje de fragmentos embebidos en el suelo, diríamos internos, se extrajo de los análisis de granulometría de la fracción total del suelo, quedando como sigue (Tabla 48):

Tabla 48. Resultados del porcentaje de fragmentos rocosos en la matriz del suelo.

Muestra	%AF _{RK}	Muestra	%AF _{RK}
MC_01_A1	6.21	MC_02_A1	6.90
MC_01_A2	6.08	MC_02_A2	4.86
MC_01_A3	6.14	MC_02_A3	4.13
MC_01_B4	0.32	MC_02_B4	1.04
MC_01_C1	13.10		
TP_01_A1	8.14	TP_02_A1	6.77
TP_01_A2	9.33	TP_02_A3	7.21
TP_01_B6	2.99	TP_02_A4	2.22
TP_01_C2	23.28		
TP_01_D4	0.48		
TSA_01_A1	2.49	TSA_02_A1	2.87
TSA_01_A3	3.09	TSA_02_A2	4.29
TSA_01_B1	6.46	TSA_02_A3	5.29
TSA_01_B3	2.69	TSA_02_A4	1.05
TSA_01_B4	1.19		

Estos últimos resultados fueron los que se usaron en la evaluación de la erodibilidad (Factor K) con la consideración del umbral del 10%, ya que la presencia de fragmentos rocoso mejora la estructura del suelo proporcionándole una mayor capacidad de resistencia estructural y favorece el esponjamiento, la infiltración de agua y gases y por ende la formación de agregados. Así pues se considera positiva la presencia de estos fragmentos, teniendo en cuenta que bajo este valor del 10% todas estas características son muy poco apreciables, de ahí el establecimiento de este umbral.

Como podemos observar en la Tabla 48, son dos las muestras que se reportaron por encima de este umbral, por lo que se esclarece la definición del suelo como de estructura pobre, masiva, compacta sin horizontes de clasificación, como ya se indicó.

5.3.4. Índice de Fournier Modificado (MFI)

Debido a que el cálculo de este índice requiere de largas hojas de cálculo de *excel*, en este apartado sólo se muestran los resultados finales de las cuatro estaciones consideradas, para revisar los cálculos completos remitirse a el Anexo 1. La ecuación de cálculo es la número 66 (apartado 4.2.2), y sus valores de clasificación se encuentran relatados en la Tabla 27. A continuación se muestran los resultados obtenidos (Tabla 49):

Tabla 49. Resultados del Índice de Fournier modificado, MFI.

	Promedios	Período	Nº Años	Años con dato
El Peaje 24024	74.65	1980 - 2012	33	33
Santiago Villa de Arriaga 24078	72.46	1981 - 2012	33	33
San Luis potosí 24111	60.40	1982 - 2011	32	27
Pino Suarez 32127	80.20	1983 - 2012	33	33

Los resultados alumbran unos rangos del índice de Fournier establecidos en los niveles bajos, cercanos al umbral de moderados, según la Tabla 27 del presente texto.

5.3.5. Índice de erosividad EI_{30} .

Del mismo modo que para el MFI, los cálculos eran demasiado extensos para ubicarlos en este apartado por lo que se remiten al Anexo 1. La fórmula de cálculo se expresa según la ecuación 67 y los rangos para categorizar los resultados vienen en la Tabla 28 del apartado 4.2.2. A continuación se muestran los resultados obtenidos (Tabla 50):

Tabla 50. Resultados del Índice de erosividad, E_{I30} .

	Promedios	Período	Nº Años	Años con dato
El Peaje 24024	1736.68	1980 - 2012	33	33
Santiago_Vill Arriaga 24078	1585.25	1981 - 2012	33	33
San Luis potosí 24111	1220.07	1982 - 2011	32	27
Pino Suarez 32127	1733.99	1983 - 2012	33	33

Así pues, estos promedios se establecen en una agresividad climática de las precipitaciones media, pero el problema reside en la estacionalidad observada y en la condición del suelo al aparecer tales lluvias.

5.3.6. Erodibilidad K

El proceso y método de cálculo se resumen en el apartado 3.5 a partir del algoritmo *KUERY1.4*, la forma en que fue usado en los cálculos de este estudio en referencia a los modelos propuestos viene en el apartado 4.2.2, encontrándose en la Tabla 30 los rangos de evaluación del factor.

La Tabla 51 resume los resultados obtenidos a los que se llegó tras introducir los datos en el programa del algoritmo *KUERY1.4*, se muestra a continuación:

Tabla 51. Resultados de la evaluación de la erodibilidad. Nota: (max K) percentil máximo seleccionado del cálculo del factor K; (p50%) percentil 50 seleccionado del cálculo del factor K

Muestra	%AF _{RK}	%M.O.	ESP	Arcilla	Limo	Arena	Textura	Factor K	Percentil de cálculo
MC_01_A1	6.21	1.3188	11.44	10	39	51	Franco	0.03324	max K
MC_01_A2	6.08	0.8122	8.66	9	40	51	Franco	0.03074	max K
MC_01_A3	6.14	0.7163	3.10	16	37.5	46.5	Franco	0.02718	p50%
MC_01_B4	0.32	1.9815	14.78	42.5	23	34.5	Arcilloso	0.02347	max K
MC_01_C1	13.10	0.3881	4.30	8,5	13	78.5	Arenoso-Franco	0.00638	p50%
TP_01_A1	8.14	1.1497	5.65	11	31.5	57.5	Franco-Arenoso	0.02514	p50%
TP_01_A2	9.33	0.7951	1.96	11.5	29.5	59	Franco-Arenoso	0.02626	p50%
TP_01_B6	2.99	2.3495	22.13	2.5	12.5	85	Arenoso-Franco	0.02506	max K
TP_01_C2	23.28	0.8523	1.96	15.5	29	55.5	Franco-Arenoso	0.00719	p50%
TP_01_D4	0.48	2.2798	12.08	41.5	28.5	30	Arcilloso	0.02337	max K
TSA_01_A1	2.49	2.2116	8.80	22.5	46.5	31	Franco	0.02662	max K
TSA_01_A3	3.09	2.2916	1.61	23	35	42	Franco	0.02372	p50%
TSA_01_B1	6.46	2.5853	6.47	19.5	36.5	44	Franco	0.02572	p50%
TSA_01_B3	2.69	2.0425	1.34	20	42	38	Franco	0.02034	p50%
TSA_01_B4	1.19	3.6613	2.83	52	17	31	Arcilloso	0.01956	p50%
Muestra	%AF _{RK}	%M.O.	E.S.P.	Arcilla	Limo	Arena	Textura	Factor K	Percentil de cálculo
MC_02_A1	6.90	1.5213	6.33	13	32	55	Franco-Arenoso	0.02421	p50%
MC_02_A2	4.86	0.9896	3.36	11	33.5	55.5	Franco-Arenoso	0.02515	p50%
MC_02_A3	4.13	1.9162	16.89	24.5	38	37.5	Franco	0.02169	max K
MC_02_B4	1.04	5.2147	6.10	58	14	28	Arcilloso	0.02011	p50%
TP_02_A1	6.77	2.7996	2.80	21	25	54	Franco-Arcillo-Arenoso	0.02999	p50%
TP_02_A3	7.21	2.9343	3.06	21	32	47	Franco	0.02481	p50%
TP_02_A4	2.22	4.1737	3.49	45	14.5	40.5	Arcilloso	0.01891	p50%
TSA_02_A1	2.87	2.7310	4.87	36	19	45	Franco-Arcillo-Arenoso	0.02003	p50%
TSA_02_A2	4.29	2.6576	2.11	22	36	42	Franco	0.02716	p50%
TSA_02_A3	5.29	2.3353	2.37	18	42	40	Franco	0.02544	p50%
TSA_02_A4	1.05	5.8894	4.67	59	10	31	Arcilloso	0.02048	p50%

Para la mejor visualización de los rangos de clasificación que suponen estos datos, se vuelve a presentar la Tabla 30

Tabla 30. Clasificación en rangos del factor K

Valor	Clase
0 – 0.01	Bajo
0.01 – 0.02	Medio Bajo
0.02 – 0.03	Medio
0.03 – 0.04	Medio Alto
0.04 – 0.05	Alto
> 0.05	Muy Alto

Los valores observados (Tabla 51) relatan una erodibilidad establecida en los rangos medio bajo a bajo en general, con algunas muestras que pasan al rango medio alto en la subárea MC_01. En general la tendencia es a disminuir con la profundidad, lo que es beneficioso ya que a valores más bajos del factor K, mayor protección intrínseca a sus características tiene un suelo y ofrece mayor resistencia a la erosión. Así pues las capas superficiales de estos suelos tienden a ser más fácilmente erosionados que las capas más profundas, lo que añade un grado de complejidad a las observaciones de los análisis de laboratorio, al ser la capa más profunda, el horizonte arcilloso, el que más problemas de salinidad presentaba y el que acumula los valores más altos de todos los análisis realizados, de manera que el equilibrio entre fuerzas de resistencia y factores de desestabilización es el que se presenta muy complejo. A este respecto, los valores de erodibilidad que presentan estos horizontes son coherentes con todos los datos analizados.

5.4. Resultados de los modelos

5.4.1. Modelo MPSIAC

En el cálculo numérico de este modelo la ecuación de puntuación del rendimiento de sedimentos queda así, al sustituir en la ecuación 3, las ecuaciones parciales de cada factor:

$$R = X_1 + 16.67K + 0.2P_{2-6h} + (0.006V_{ae} + 10QP) + 0.33S + 0.2\%Sd + 20 - 0.2\%Cv + 0.25SSF + 1.67SSFg$$

Para X_1 se uso la tabla de resultados expuestos en la Tabla 23.

Para X_2 se creó la Tabla 53 de cálculos

Tabla 52. Cálculo del subfactor X_2 del modelo MPSIAC

Promedios de K		X2= 16,67K	Promedios de K		X2= 16,67K
MC_01	0.0287	0.4777	MC_02	0.0244	0.4062
TP_01	0.0205	0.3415	TP_02	0.0227	0.3786
TSA_01	0.0232	0.3866	TSA_02	0.0224	0.3734

Para X_3 el valor adoptado por las consideraciones ya relatadas en el apartado 4.2.1 fue 32.9 mm.

Para X_4 , con respecto al volumen de escorrentía anual se realizó el promedio de la precipitación anual de las estaciones meteorológicas implicadas en las áreas de estudio según muestra la Tabla 53 y se multiplicó por el coeficiente de escorrentía. Para el coeficiente de escorrentía se usaron los valores 0.6 y 0.4 que representan los escenarios desfavorable y conservador como se explica en el apartado 4.2.1.

Después se calculó el tiempo de concentración para cada subárea según la ecuación 65, resultados que se incluyeron en la ecuación de la curva de precipitación para las lluvias de 24 h con un período de retorno de 2 años (Figura 34) conociendo así el dato de intensidad a que se refiere la fórmula 64.

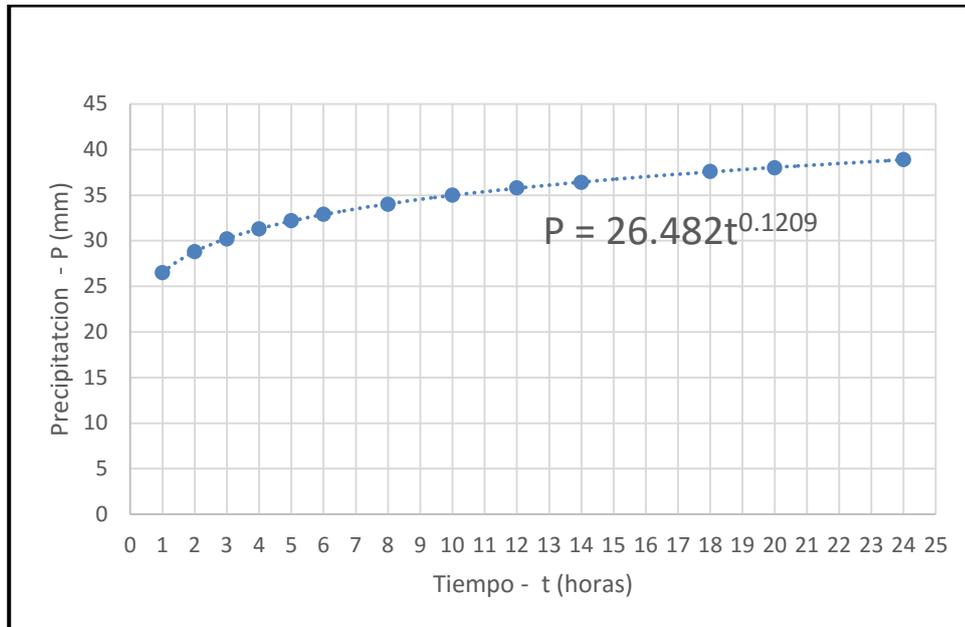


Figura 34. Curva de precipitación en 24h para un período de retorno de 2 años. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de Llanas-Rivera, 2002

A continuación se calculó el área de cada subárea por medio del programa *ArcGIS*, último dato para el cálculo del caudal máximo anual y se generó una tabla con todos los resultados (Tabla 53). Finalmente quedó sustituir los subfactores calculados en la ecuación para la variable ($X_4 = Q_m * 50 + V_{ae} * 0.03$)

Tabla 53. Resultados de cálculo del caudal máximo anual (Q_m) y volumen anual e escorrentía (V_{ae})

	Estaciones seccion.	Prom precipit anual	C1 Es_D	C2 Es_C	Vae Es_D	Vae Es_C	L (m)	S %	vS	Tc (h)	Intensidad	Area Km2	Qmax Es_D	Qmax Es_C
MC_01	Peaje y SLP	388.45	0.6	0.4	233.07	155.4	107	14	3.74	0.00457	13.80	0.0549	0.1265	0.0843
MC_02			0.6	0.4			170	17	4.12	0.00606	14.28	0.0718	0.1711	0.1141
TP_01	Peaje, Santiago o y Pino Suarez	412.7	0.6	0.4	247.62	165.1	1025	4.1	2.02	0.04177	18.04	0.4854	1.4605	0.9737
TP_02			0.6	0.4			1585	6.4	2.54	0.04911	18.40	1.2468	3.8256	2.5504
TSA_01			0.6	0.4			1104	5.3	2.31	0.03993	17.94	0.3255	0.9741	0.6494
TSA_02			0.6	0.4			703	8.4	2.90	0.02371	16.85	0.1543	0.4337	0.2891

Los resultados finales de la variable X_4 para los escenarios más desfavorable y conservador se presentan en la Tabla 54:

Tabla 54. Resultados de la variable X_4 del modelo MPSIAC

Subáreas estudio	X_4 Des.	X_4 Cons.
MC_01	13.3151	8.8767
MC_02	8.5568	5.7045
TP_01	80.4547	53.6365
TP_02	191.2780	127.5180
TSA_01	48.7037	32.4691
TSA_02	21.6828	14.4552

Para X_5 se utilizó la Tabla 24 que relaciona la pendiente con cada subárea, los promedios de pendiente difieren de los calculados para la variable X_4 porque esos están referidos a toda la microcuenca en dirección al punto de concentración (o de salida de la microcuenca), mientras que los de esta variable X_5 lo están sólo para el área de estudio concreta, que suele hallarse en una de las laderas de la microcuenca.

Tabla 24. Promedios generales de las áreas de estudio.

Área estudio	General 1	General 2	Subárea_01	Subárea_02
	%	%	%	%
MC	16.5	18.2	13.8	16.3
TP			11.9	9.8
TSA	7.0	18.4	6.2	10.1

Para X_6 y X_7 se utilizó la misma metodología se consideró como porcentaje de suelo desnudo la suma del uso con esa nomenclatura, los afloramientos rocosos y el uso agrícola y el suelo con cobertura los restantes usos. La Tabla 55, que se muestra a continuación, fue calculada a partir de la Tabla 25 del apartado 4.2.1. del presente texto.

Tabla 55. Resultados de la variable X_6 y X_7 del modelo MPSIAC

Subárea	%Suelo_desnud	%Suelo_cober
MC_01	89.50	10.50
MC_02		
TP_01	78.56	21.44
TP_02		
TSA_01	77.77	22.23
TSA_02		

Para X_8 y X_9 se creó una única tabla excel (Tabla 56) que contenía los valores observados en las categorías correspondientes al método SSF descrito en el punto 4.2.1 del presente texto.

Tabla 56. Resultados del método del SSF para calcular las variables X_8 y X_9

Subáreas E	Mov Su	Mov Mant	Frag. Roc. Sup.	Grado Pedestales	Des. Patron Flujo	Surcos	Carcavas	Total SSF
MC_01	11	8	8	14	9	12	15	77
MC_02	11	11	8	6	12	12	15	75
TP_01	14	11	14	11	12	14	15	91
TP_02	9	9	11	9	11	11	15	75
TSA_01	10	9	12	10	11	10	15	77
TSA_02	9	8	13	12	10	11	15	78

Finalmente la tabla 57, de todas las variables del método ($X_1 - X_9$) quedó como se muestra a continuación, concluyendo el *Rating* que es la suma de todos las variables a través de las ecuaciones de la Tabla 8 del apartado 1.5.5.

Tabla 57. Resultados de la puntuación (*Rating*) de las variables de cálculo de los factores del modelo MPSIAC

Area estudio	Y1	Y2	Y3	Y4 Des	Y4 Cons	Y5	Y6	Y7	Y8	Y9	Rating Desfavor.	Rating Conserva.
MC_01	2	7.9633	6.58	2.663	1.77535	4.55	17.9	17.9	19	25	103.86	102.97
MC_02	2	5.6928	6.58	3.1098	2.07319	5.38	17.9	17.9	19	25	102.36	101.32
TP_01	3.67	6.4446	6.58	16.091	10.7273	3.93	15.7	15.7	23	25	115.94	110.57
TP_02	3.67	6.7714	6.58	39.741	26.4942	3.23	15.7	15.7	19	25	135.22	121.97
TSA_01	3.04	6.3113	6.58	11.226	7.48431	2.05	15.6	15.6	19	25	104.61	100.87
TSA_02	3.04	6.2246	6.58	5.8223	3.88152	3.33	15.6	15.6	20	25	100.66	98.72

Como se observa la consideración del coeficiente de escorrentía en dos escenarios no supone una variación significativa en los resultados, ya que dentro de las clases descrita para el modelo y la clasificación de sus rendimientos no produce cambios significativos, como se puede observar en la Tabla 58:

Tabla 58. Grados de intensidad, clases y rendimientos teóricos del Rating del modelo MPSIAC

Rating	Intensidad	Clase	Rendimiento T/ Km ²	Rendimiento m ³ / Km ²
>100	Muy alto	5	2500	>1450
75 - 100	Alto	4	1500-2500	450-1450
50 - 75	Medio	3	500-1500	250-450
25 - 50	Bajo	2	200-500	95-250
<25	Muy Bajo	1	<200	<95

De este modo los resultados para todas las áreas de estudio quedan emplazados en la categoría 5, pero a continuación se presentan en números para poder ser evaluados frente al modelo de comprobación. Como ya se citó en varias ocasiones la ecuación de Johnson y Gembhart (1982) para el rendimiento de sedimentos, la ecuación 2 de este texto, apartado 1.5.5., es la que determina el modelo para el cálculo y es la que se usó para determinar el total de erosión actual.

Tabla 59. Resultado final el modelo MPSIAC

Rating Desfavor.	Rating Conserva.	Sy D (m ³ /km ² /y)	Sy C (m ³ /km ² /y)	Sy D (T/ha/y)	Sy C (T/ha/y)
103.86	102.97	782.19	757.59	10.17	9.85
102.36	101.32	741.11	713.96	9.63	9.28
115.94	110.57	1208.24	996.08	15.71	12.95
135.22	121.97	2419.08	1501.54	31.45	19.52
104.61	100.87	803.63	702.34	10.45	9.13
100.66	98.72	697.01	649.97	9.06	8.45

Así pues como muestra la Tabla 59 el resultado para los dos escenarios es muy similar lo que indica poca sensibilidad del factor contrastado frente al modelo total, es decir, no es un factor de los más significativos, por otro lado el modelo ajusta bastante bien con las clases y rangos teóricos mostrados en la tabla 58. En sí, son unas pérdidas de suelo por erosión muy agresivas, con alto rendimiento de sedimento y mucha problemática ya que, si se piensa, en pocos años, digamos 5, con estas producciones pueden llegar a perderse cerca de 155 toneladas de suelo en el caso más extremo. Así pues tomando en cuenta las consideraciones de lo observado en campo el resultado es coherente, pues en las visitas se denotaba un paisaje muy devastado por la erosión. Falta comprobar la solidez de los cálculos en contraste con el modelo de comprobación.

5.4.2. Modelo RUSLE

Como ya se citó, la ecuación 1 (apartado 1.5.1.) que responde ante el modelo, es la de la ecuación universal de pérdida de suelo (USLE). Como este modelo se realizó totalmente en base digital, se mostrarán los resultados de las capas *raster* calculadas para él.

~ La erosividad de la lluvia (Factor R) de los índices calculados se seleccionó el EI₃₀ según la metodología de Calzolari *et al.* (2001) los resultados están indicados en la tabla 50 y el resultado de la interpolación en *ArcMap* se muestra a continuación (Figura 35) en forma similar a un mapa para el mejor entendimiento de las isóneas mostradas, pero en realidad es el *raster* usado sobre el programa *ArcGIS*.

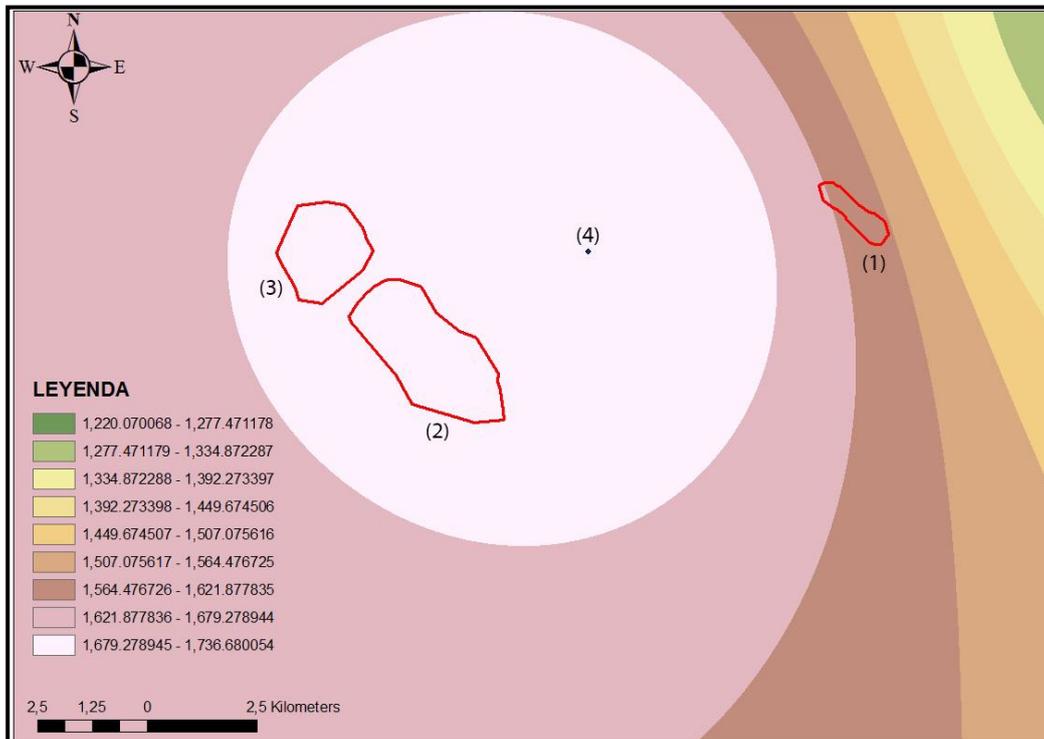


Figura 35. Raster de interpolación del índice de erosividad EI_{30} usada para el modelo RUSLE. (1) AE MC; (2) AE TP; (3) AE TSA; (4) Estación meteorológica El Peaje

~ Para la erodibilidad del suelo (Factor K) los datos fueron calculados a través del algoritmo *KUERY1.4* y el raster final de con los datos interpolados se muestra en la Figura 36.

En la imagen las áreas completamente en "negro" tienen el valor más bajo y se le introdujo la consideración de los afloramientos rocosos, por lo que éstos aparecen como manchas negras sobre el mapa, ya que se consideró que el valor de erodibilidad para ellos era de 0.0001

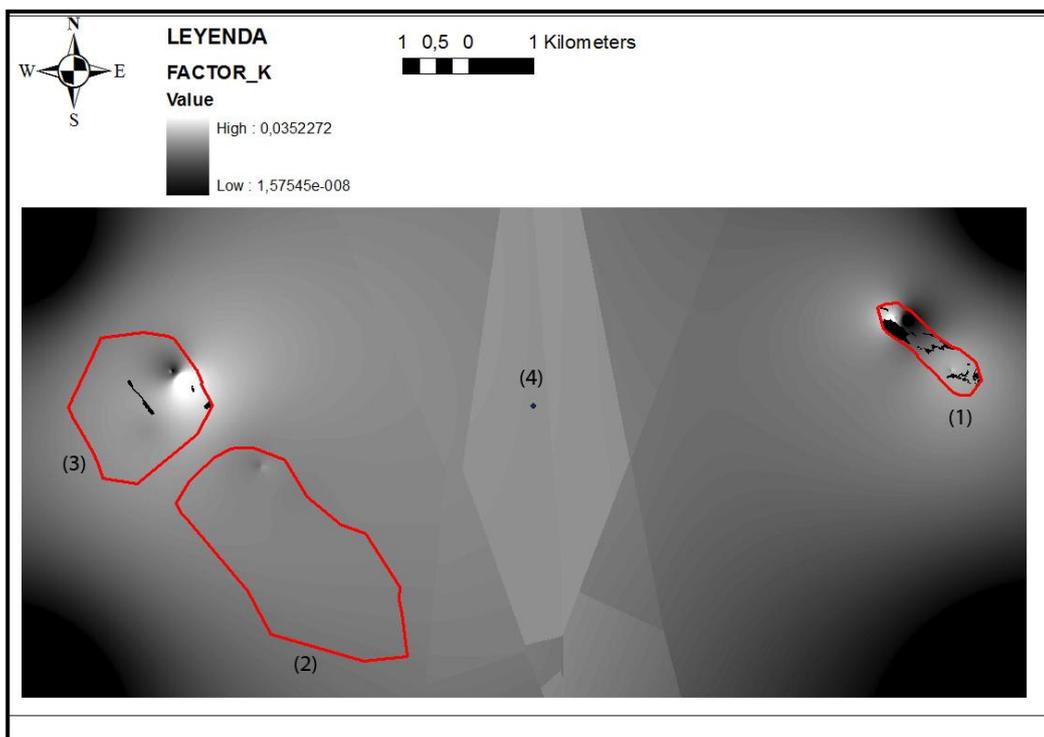


Figura 36. Raster de interpolación de los datos empíricos del índice de erodibilidad del modelo RUSLE. (1) AE MC; (2) AE TP; (3) AE TSA; (4) Estación meteorológica El Peaje

~ Para el Factor Topográfico (Factor LS) se consideraron todos los pasos descritos en el apartado 4.2.2 (pág. 90) y se obtuvo un *raster* de salida que se muestra a continuación (Figura 37).

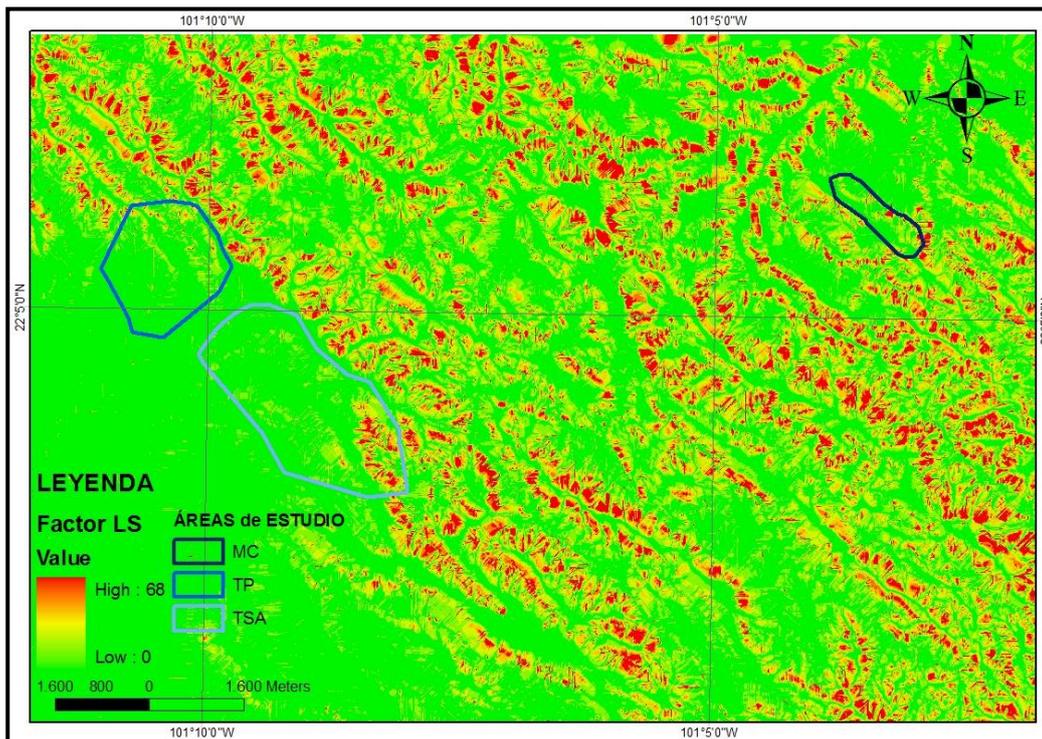


Figura 37. Resultado del cálculo del factor LS del modelo RUSLE

~ Para el Factor de cobertura vegetal y manejo (Factor C) se realizó la revisión supervisada de las imágenes recientes de *Google Earth* y se obtuvo el *raster* que se muestra a continuación aquí en forma de mapa de salida (Figura 38).

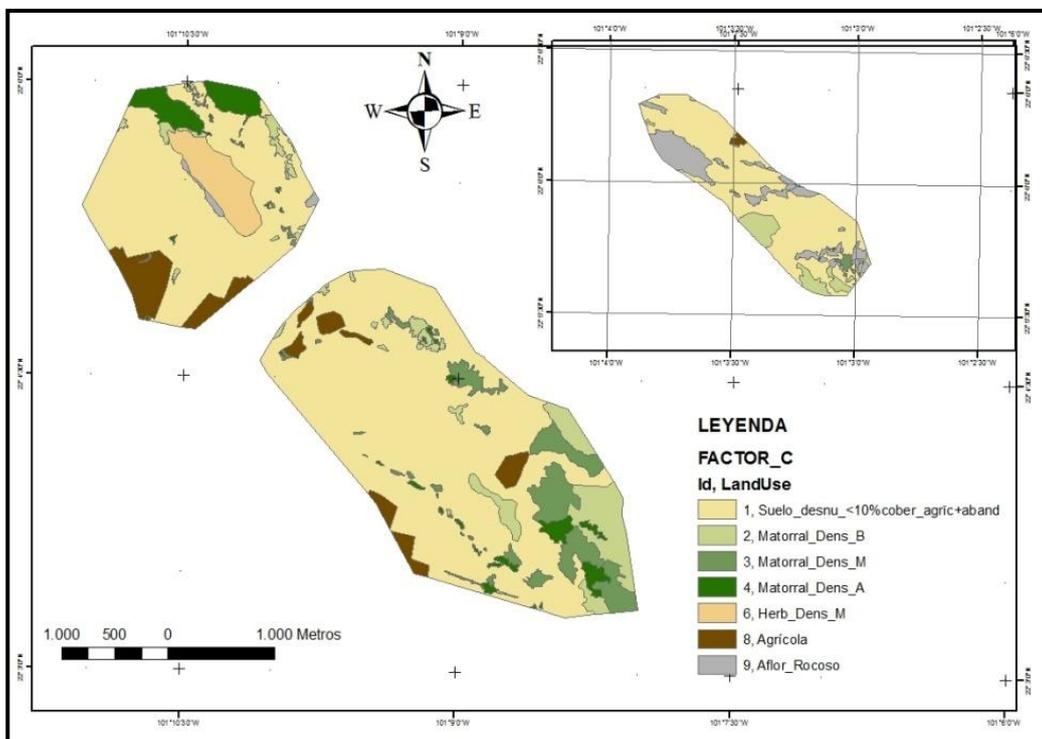


Figura 38. Resultados del mapa de usos de suelo para el factor C del modelo RUSLE

~ Para el Factor de protección (Factor P) se operó de la misma manera que para el factor C, se creó la capa *shape* tras realizar los polígonos sobre una imagen real actualizada, que luego fue *rasterizada* para así poder ser incluida en el cálculo; se muestra como mapa de salida (Figura 39).

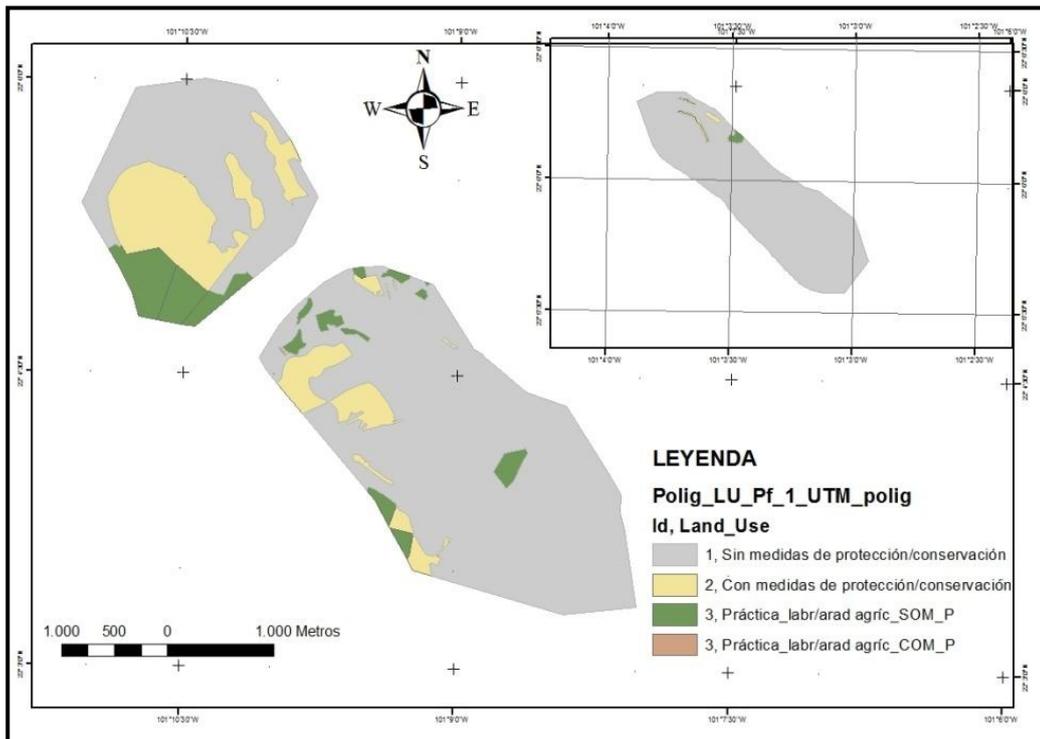


Figura 39. Resultados del mapa de protección del suelo para el factor P del modelo RUSLE

~ Debido a que todas las capas o coberturas deben tener el mismo formato y tamaño se realizó una máscara de corte con base a los polígonos de las áreas de estudio, para así poder realizar la multiplicación que dicta la ecuación USLE. Finalmente a través de la función *raster calculator* del programa y con todas las capas ya en el mismo formato y tamaño, se realizó la multiplicación obteniendo el siguiente resultado (Figura 40)

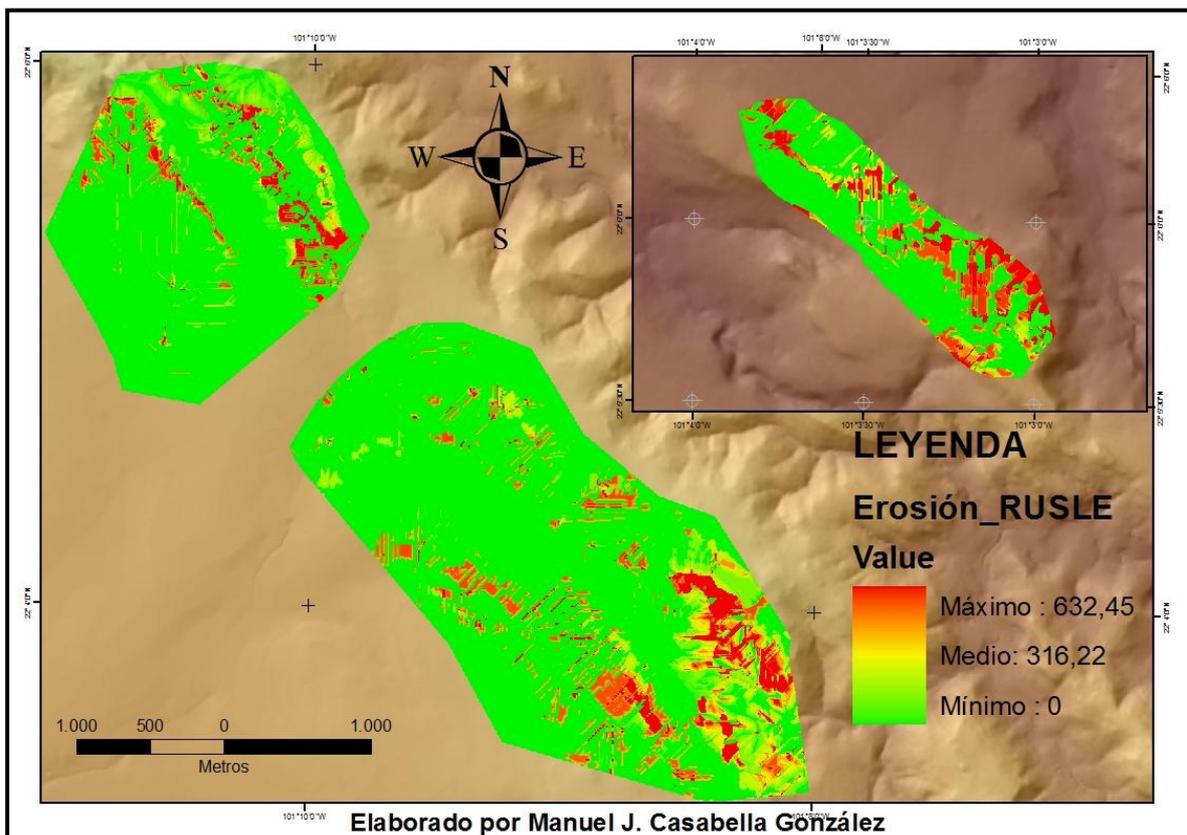


Figura 40. Mapa final de erosión del modelo RUSLE

En este mapa final de erosión el marco principal que refleja el estado de las áreas de estudio 2 y 3 está en una escala 1:27000 mientras que, a fin de que se apreciara mejor el área de estudio 1 se le dio una escala de 1:20000, debido a la distancia entre áreas hubo que realizar la partición en dos marcos.

Los valores de erosión actual que muestra este modelo nos llevan a rangos de erosión muy altos. Como podemos apreciar en la Figura 41, hay muchas zonas de las tres áreas de estudio que alcanzan el valor máximo de 632.45 m³/Km²/año; para categorizar por subáreas diremos que las que peor escenario de erosión contemplan son MC_02 y TP_01, en la Figura 41 se puede constatar este hecho.

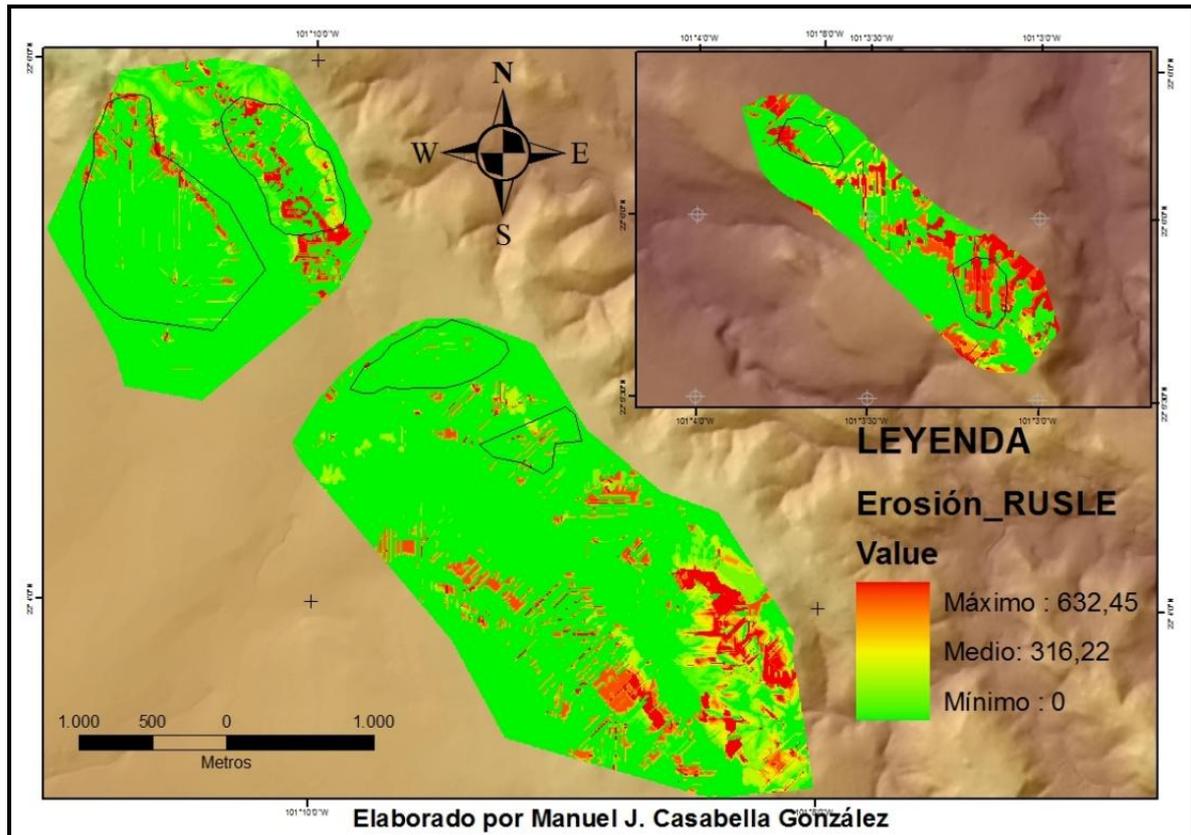


Figura 41. Ubicación de las subáreas de estudio en el mapa de final de erosión

Aún en contraste con el modelo anteriormente calculado el MPSIAC, los valores parecen ser más bajos, pero si promediamos los valores del modelo numérico encontramos que los rendimientos en las mismas unidades que éste, el de base física, ya se asemejan algo más, sobre todo al contrastarlas con el escenario conservador, así pues los promedios citados son de 1093.78 y 877.23 m³/Km²/año para el escenario más desfavorable y conservador respectivamente.

Contando con que al transformar las unidades el dato del modelo RUSLE queda en 8.22 T/ha/año, la diferencia con la mayoría de las subáreas del modelo MPSIAC no es tan abrumadora, refiriéndonos siempre al escenario conservador; también se debe contar que un modelo empírico como el que se ha desarrollado en este trabajo tiene en consideración más observaciones y de mayor exactitud que uno basado en la observación remota y por ende, también es más fácil que se dé el error del analista inherente a cada persona en la arbitrariedad de las observaciones.

Tabla 61. Comparativa final de resultados de ambos modelos MPSIAC y RUSLE

MODELO MPSIAC				MODELO RUSLE	
Sy D (m ³ /km ² /y)	Sy C (m ³ /km ² /y)	Sy D (T/ha/y)	Sy D (T/ha/y)	A (m ³ /km ² /y)	A (T/ha/y)
782.19	757.59	10.17	9.85	632.45	8.22
741.11	713.96	9.63	9.28		
1208.24	996.08	15.71	12.95		
2419.08	1501.54	31.45	19.52		
803.63	702.34	10.45	9.13		
697.01	649.97	9.06	8.45		

5.5. Discusión

Todos los análisis realizados y las observaciones tomadas en campo de los suelos presentes en el estudio plantean un escenario de erosión muy agresiva y diríamos descontrolada. Tanto los análisis físicos como químicos indican un perfil de poca resistencia frente al proceso erosivo o cuya resistencia más acuciada es la costra superficial que por el efecto del clima y la salinidad se forma, siendo un remedio poco deseable ya que en cuanto el líquido que escurre encuentra una debilidad ya sea grieta o hendidura, permite el inicio del proceso.

Las propiedades de los suelos presentan en general, una estrecha relación con los materiales parentales de los cuales han evolucionado, por comparativa de elementos mayores, tanto de materiales residuales de rocas expuestas a la intemperie el tiempo suficiente para permitir el desarrollo del suelo, como también de materiales minerales o fragmentos de rocas que han sido erosionados, removidos de las partes altas y transportados a las partes bajas por acción del agua, del viento, o por gravedad.

Los análisis del tipo físico predicen una alta salinidad, en cuanto a la resistencia al corte superficial y la baja densidad que presentan los suelos, con zonas de saturación de bases que al lixiviarse por razones de lluvias dejan una estructura debilitada y de fácil colapso. De hecho la caracterización del perfil tipo nos habla de unas capas superficiales cuya única resistencia es la compactación que poseen a través del tiempo y los efectos climáticos de los cambios bruscos de temperatura, más bien parecen una aglomeración depositada sobre el horizonte arcilloso, que cualquier tipo de estructura. Este último tiene una estructura más desarrollada y estable, hasta que los efectos de la salinidad entran en juego.

Los supuestos de los análisis físicos han sido después constatados por los análisis químicos en cuanto a la salinidad. En suelos bien estructurados, las partículas de arcilla cargadas negativamente se mantienen unidos por los iones de calcio (Ca^{2+}) principalmente (también Mg, Al, etc.). Sin embargo, en ambientes de poca lluvia o lluvia muy estacional, la acumulación de sodio (Na^+) de las precipitaciones acaba desplazando el catión Ca^{2+} de las partículas de arcilla. Hipotéticamente las partículas de arcilla quedarán así vinculadas por iones Na^+ , por lo que el suelo será sódico; sin embargo, para mantener la arcilla bien estructurada se necesita aumentar 10 veces la concentración de Na^+ en contraste con su estado anterior. Además, como el Na^+ es altamente soluble, las siguientes lluvias pueden diluir este Na^+ en la solución del suelo y entre las partículas de arcilla. Como resultado, la concentración de Na^+ disminuye provocando que las partículas de arcilla se separen, resulten jabonosas cuando se humedezcan y al secarse se conviertan en un perfil del tipo masivo y duro. Es de este modo que la sodicidad provoca el colapso de la estructura del suelo.

Los resultados obtenidos para la sodicidad a través de los análisis de capacidad de intercambio catiónico y de concentración de bases intercambiables nos hablan de un escenario de sodicidad, en las áreas que nos ocupan, poco deseable y complejo, y confirmado a través el porcentaje de sodio intercambiable (ESP) ya que en 11 de las 28 muestras se supera el umbral señalado de problemas no deseados por salinidad. Las muestras que presentan la problemática descrita son (MC_01_A1, A2 y B4, TP_01_B6 y D4, TSA_01_A1 y B1, MC_02_A1, A3, y A4), principalmente de la costra superficial y de la máxima profundidad, el horizonte arcilloso.

En principio el horizonte profundo arcilloso es una capa de buena cohesión, con lo que podría ser una incipiente iniciación de pedogénesis, de alto contenido de materia orgánica, pH neutro y buenas condiciones estructurales. Aunque debido a la constante lixiviación de materiales que recibe de las capas superficiales, tiene un alto contenido de sales, por lo que tiene así una buena capacidad de intercambio catiónico, lo que sería deseable para fines agrícolas, pero igual no tanto para fines conservacionistas ya que el aumento de la salinidad, como hemos visto, debilita su estructura y facilita su erosión sobre todos tras unas lluvias intensas. Sobre este horizonte arcilloso bien definido descansa un único horizonte arenoso semicompactado mucho más ligero y de pH más bien ácido que muestra, por sus características intrínsecas, una mayor erodibilidad y permite la lixiviación de sales, denotando una baja conductividad eléctrica y un bajo contenido en materia orgánica.

La granulometría de estas capas viene a argumentar todo lo citado ya que se observa que la fracción que prevalece es de tamaño fino en el grupo de las arenas primordialmente, con ausencia de fragmentos rocosos de mayor tamaño, lo que podría dar algo de consistencia y estabilidad; así pues el equilibrio

dinámico hídrico y gaseoso que es parte primordial de los suelos queda muy disminuido, dificultando el establecimiento de cobertura vegetal que sería un excelente factor de resistencia ante la erosión. Además este hecho se agrava con el carácter sódico que presentan estos suelos. Así pues al iniciarse el proceso erosivo encuentra poca resistencia de las capas superiores y fácilmente y de manera incisiva alcanza los horizontes profundos.

Las características salinas, las pendientes pronunciadas y la poca protección por cobertura de las áreas de estudio permiten una concentración de flujos que fácilmente provoca surcos y cárcavas. Cuando estos alcanzan el horizonte arcilloso el complejo estado salino-sódico desestabiliza las arcillas, a través del proceso que se citó anteriormente, provocando el colapso de las paredes de los canales de flujo y un crecimiento más rápido de los mismos. Es así como las características analizadas influyen en los rendimientos de sedimentos relatados por los modelos desarrollados para este estudio. Ese complejo estado de salinidad a profundidad, suele ver aumentadas sus peores características a pHs altos tal y como ocurre en los suelos analizados, donde los pHs más altos se encuentran en el horizonte arcilloso y aunque los suelos no mostraron un comportamiento dispersivo en el test de Emerson Crumb (test de dispersividad) si eran fácilmente desmoronables al solo contacto con el agua (fenómeno de *slaking*) sobre todo los agregados del horizonte arcilloso, lo que hace suponer que en ese complejo equilibrio ganan las fuerzas desestabilizadoras, principalmente la sodicidad, a los factores de resistencia como la cohesión proporcionada por la materia orgánica, estableciendo un escenario en el que cuando empieza el proceso y llega a hasta la base, ya se hace difícilmente controlable.

Los resultados de evaluación de la erodibilidad nos muestran una tendencia a la mejora y mayor protección intrínseca según aumenta la profundidad, lo que contribuye de forma positiva al equilibrio de estabilidad salino-estructural. El método usado a este fin se muestra muy asequible y coherente y produce un aproximación bastante fiel que tiene en cuenta las premisas adecuadas para una buena evaluación del factor y establecen una buena correlación con los procesos reales ya que, al ser clasificados dentro del rango medio, se denota el equilibrio consecuente de que si fueran más altos y el propio suelo no tuviera ninguna resistencia, posiblemente ya no encontraríamos material de estudio, pues habría sido totalmente transportado del área; si por el contrario, la erodibilidad fuera de carácter muy bajo (mayor protección) probablemente las áreas de estudio no se hallarían en el avanzado estado de erosión que se encuentran.

En la evaluación de ambos modelos se demuestran como variables más significativas el efecto topográfico y la agresividad del clima como factores de energía o activadores del proceso y la erodibilidad principalmente, aunque también el porcentaje de cobertura como factores de resistencia. De la evaluación de la erodibilidad se denota que los valores más altos del factor K siempre van asociados a porcentajes de limos cercanos o superiores al 40%, asociados a bajos niveles de arcilla, por lo que se puede clasificar a éstos como desestabilizadores en términos generales de la estructura de los suelos.

Finalmente los resultados de los modelos se muestran coherentes con las características descritas, era de esperar unos rangos de producción de sedimentos elevados, en la literatura podrían parecer moderados, porque en muchos casos se reportan cantidades de 500, 1000 T/ha/año; por ejemplo Sancholuz (1984) reporta valores de erosión de hasta 492 Ton/ha/año y Raa (1983) de hasta 1296 Ton/ha/año (citados por Maldonado-Hernández, 2001), pero son valores que dependen de muchas características y en mayor medida del método usado, además, normalmente se encuentran en la literatura más antigua. En la literatura del modelo usado, el MPSIAC, se reportan valores de 0.007 a 28.6 T/ha/año (Parehkar *et al.*, 2013) de 1 a 18.85 T/ha/año (Bagherzadeh, 2012) 6.99 a 9.99 (Najm *et al.*, 2013) por poner ejemplos, con la ventaja de que estos estudios se han realizado en ambientes climáticos similares a los del área estudiada.

6. Conclusiones

De todos los trabajos y análisis realizados se extrae que:

- Las áreas de estudio son zonas de elevada y acelerada erosión que poseen suelos de débil estructura, con perfiles poco desarrollados calificados como Regosoles, pero que parecen tener características que ajustan más al grupo de los Lixosoles por las observaciones que han alumbrado los resultados de los análisis de laboratorio.
- La tendencia observada en estos suelos suele designar poca actividad en superficie y mayor actividad en profundidad, por lo que casi todos los análisis de laboratorio han mostrado esta tendencia. Así pues la capacidad de intercambio catiónico, el porcentaje de cationes de cambio, el pH, la conductividad, el índice de estabilidad electroquímica y el porcentaje de sodio intercambiable aumentan en el horizonte inferior, el horizonte arcilloso. Por otro lado la erodibilidad y la densidad del suelo se reducen.
- Las relaciones entre todos estos factores de caracterización del suelo forman un complejo estado de equilibrio en el que parecen vencer las fuerzas desestabilización, agravado por la ausencia de factores de protección externos como la cubierta vegetal y posiblemente acelerado de forma antrópica, debido a las características históricas de las áreas como zona agrícola con cultivos de temporada, muchas de ellas caídas en el desuso o abandono.
- Estos suelos, con la confirmación de los análisis, se pueden declarar como salino-sódicos muchos de ellos entrando dentro del umbral de propiedades no deseadas de sodicidad como muestra los resultados del porcentaje de sodio intercambiable.
- El alto nivel de presencia de calcio se puede considera un factor de resistencia y protección sin el cual, posiblemente los suelos estarían en peores condiciones o casi desaparecidos.
- Los resultados de evaluación de la erodibilidad nos muestran una tendencia a la mejora y mayor protección intrínseca según aumenta la profundidad, lo que contribuye de forma positiva al equilibrio de estabilidad salino-estructural.
- Los resultados de difractometría muestran materiales parentales comunes a los suelos, cuarzos palgioclasas, feldespatos, etc., y bajos niveles de arcillas en superficie, claramente más altos en profundidad con caolinitas y cloritas principalmente, mostrando en algunos caso minerales del grupo de las serpentinas como la antigorita y la cronstedita.
- La granulometría y las clases texturales derivadas son, claramente, uno de los factores más significativos, tanto en la evaluación de la erodibilidad, como en los equilibrios físicos y químicos del suelo teniendo participación en todos los procesos descritos de análisis y de erosión.
- Las principales clases texturales son de suelos francos a franco-limosos, con altos contenidos de arenas y limos, lo que es coherente con lo comentado sobre los resultados de los análisis de laboratorio.
- Los modelos seleccionados han sido adecuados a las áreas de estudio y han producido unos resultados coherentes, y comparables a otra áreas del mundo con características climático geográficas semejantes.
- Los resultados reportados de entre 8 y 20 T/ha/ año en el escenario más conservador y 9 y 31 T/ha/año para el escenario más desfavorable, suponen unos niveles alarmantes de los procesos erosivos en las áreas de estudio, más y sabiendo que en algunas de ellas ya se han promovido medidas de conservación gubernamentales, que en vista de los resultados no han logrado el efecto esperado.
- Estos rendimientos de sedimento elevado pueden tener algunas consecuencias críticas si se dieran casos de acumulación en algún punto, y el hipotético caso de una liberación violenta por algún evento pluviométrico de alta energía.
- En conclusión los objetivos han sido alcanzados, la implementación del modelo MPSIAC en México ha sido coherente y los resultados demuestran que son áreas con una erosión extrema de avanzado estado y en regresión hacia los horizontes parentales.

I. Referencias

- ~ Aksoy, H., Kavvas, M.L. 2005. A review of hillslope and watershed scale erosion and sediment transport Models. *Catena* 64 (2005) pp. 247–271
- ~ Arnoldus, H.M.J. 1980. An approximation of the rainfall factor in the Universal Soil Loss Equation. In De Boodt, M. and Gabriels, D. (eds), *Assessment of erosion*. Wiley, Chichester: 127–32.
- ~ ASTM D422-63 e2, 2007. Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2007, www.astm.org
- ~ ASTM D6572-13 e1, 2013. Standard Test Methods for Determining Dispersive Characteristics of Clayey Soils by the Crumb Test, ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org
- ~ Bagherzadeh, A., Mansouri-Daneshvar, M.R. 2013. Evaluation of sediment yield and soil loss by the MPSIAC model using GIS at Golestan watershed, northeast of Iran. *Arab Journal of Geoscience* 6:3349–3362 DOI 10.1007/s12517-012-0573-y
- ~ Barboza-Gudiño, J.R., Tristán-González, M., Torres-Hernández, J.R. 1998. The Late Triassic-Early Jurassic active continental margin of western North America in northeastern México: *Geofísica Internacional*, 37(4), 283–292.
- ~ Bazzoffi, P. 2007. *Erosione del suolo e sviluppo rurale. Fondamenti e manualistica per la valutazione agroambientale*. Ed. Edagricole. ISBN-88-506-5228-3 pp. 249
- ~ Bell, L., Olson, J., Campbell, D. 2003. Assessing the extent, cost and impact of land degradation at the national level: findings and lessons learned from seven pilot case studies. Commissioned by Global Mechanism with support from the World Bank. pp. 203.
- ~ Borselli L. , Torri D. , Poesen J., Laquinta P. 2012. A robust algorithm for estimating soil erodibility in different climates. *CATENA* 97:85-94 DOI: 10.1016/j.catena.2012.05.012
- ~ Borselli L., Cassi P., Salvador Sanchis P. 2009. Soil erodibility assessment for applications at watershed scale. In "Manual of Methods for Soil and Land Evaluation", Edoardo A.C. Costantini ed., Science Publisher Inc., ISBN 978-1-57808-571-2/November 2009. pp. 600
- ~ Borselli, L., Torri, D. 2006. "Soil erosion in Italy". In "Soil erosion in Europe" J. Boardman and J. Poesen (ed.), John Willey & Sons Ltd, West Sussex. England pp.243-261
- ~ Borselli L., Cassi, P., Torri D. 2008. Prolegomena to sediment and flows connectivity in the landscape: a GIS and field numerical assessment. *CATENA* (Elsevier):75(3): 268-277. doi:10.1016/j.catena.2008.07.006
- ~ Borrough, P. A. 1986. *Principles of Geographical Information Systems: methods and requirements for land use planning*. Clarendon Press, Oxford. UK
- ~ Bouyoucos, G.J. 1962. Hydrometer method improved for making particle size analysis of soils. *Agronomy Journal* 54:464-465
- ~ Buol, S.W., Hole F.D., McCracken, R.J. 1973. *Soil genesis and classification*. The Iowa State University Press. Ames, IA. p. 360
- ~ Calzolari, C., Bartolini, D., Borselli, L., Salvador-Sanchis, M.P., Torri, D., Ungaro, F. 2001. Applicazione in ambiente collinare e montano dell'Emilia Romagna di metodologie per la stima dell'erosione del suolo e della potenzialità alla generazione del deflusso – III. Caratterizzazione delle principali unità di suolo presenti nel territorio di collina in termini di rischio di erosione: la definizione del parametro R, erosività delle piogge, per il modello RUSLE2. Internal Report 3.3, December 2001, Project 'Definizione ed Utilizzo di Strumenti di Analisi, Elaborazione e Previsione di Fenomeni Erosivi in Ambienti Collinari e Montani dell'Emilia Romagna'.
- ~ Casali J., Giménez, R., De Santisteban, L., Campo, M. A., Álvarez-Mozos, J., Goñi, M., Gastesi, R. 2009. Estado actual del conocimiento sobre la erosión por flujos concentrados en Navarra. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 2009. Nº 35 (1) pp. 63-85 ISSN 0211-6820.
- ~ Carrillo-Bravo, J. 1971, La Plataforma de Valles - San Luis Potosí: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana de Geólogos Petroleros*, 23 (1), p. 21-46.
- ~ Carrillo-Bravo, J. 1982, Exploración petrolera de la Cuenca Mesozóica del Centro de México: *Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros*, XXXIV (1), p. 21– 46.
- ~ Clark, R. 1980. Erosion condition classification system. Manual 7317. Technical Note 346. U.S. Department of the Interior - Bureau of Land Management. Denver, Colorado, US. pp. 53.

- ~ CONAFOR-UACH 2013. Línea base de degradación de tierras y desertificación. Informe final. Comisión Nacional Forestal y Universidad de Chapingo. Zapopan. Jalisco. México. pp. 161.
- ~ Cotler, H., López, C. A., Martínez-Trinidad, S. 2011. ¿Cuánto nos cuesta la erosión de suelos? Aproximación a una valoración económica de la pérdida de suelos agrícolas en México. *Investigación ambiental*, 3(2), pp. 31-43.
- ~ Day, R.P. 1965. Pipette method of particle size analysis. In: Methods of soil analysis. Agronomy 9.ASA USA.p. 553-562.
- ~ De Regoyos-Sáinz, M. 2003. Metodología para la evaluación de la erosión hídrica con modelos informáticos. Aplicación del modelo GEOWEPP a dos pequeñas cuencas en Madrid. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid, Madrid.
- ~ Doran, J. W. 1996. Methods for assessing soil quality. En: J.W. Doran and Alice J. Jones (Ed.). SSSA Special Publ. 49. *Soil Science Society of America Inc.* Madison, WI.
- ~ EPA (United States Environmental Protection Agency) 1995. Methods for evaluating solid wastes. Physical/chemical methods. Method 9045C. Soil and waste pH. SW-846 on line, USA, 5 p. pH. Método 4.1: Suspensión y determinación potenciométrica (lodos y suelos), 22p.
- ~ Emerson, W.W. 1997. A classification of soil aggregates based on their coherence in water, *Australian Journal of Soil Research*, 2 (1967), 211-217.
- ~ FAO Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2015. Recursos digitales extraídos de la página web: <http://www.fao.org/soils-2015/es/>
- ~ Figueroa, S. B., Amante O. A., Cortés T. H. G., Pimentel L. J., Osuna C. E., Rodríguez O. J. M., Morales F. F. J. 1991. Manual de predicción de pérdidas de suelo por erosión. SARH. México. pp. 150.
- ~ Gee, G.W., Bauder, J.W. 1986. Particle-size Analysis. p. 383–411. In: Klute, A.(ed.). Methods of soil analysis. Physical and mineralogical methods. Agronomy Monograph 9 (2ed).American Society of Agronomy, Madison, WI.
- ~ Giménez-Suárez, M. C. 2008. Metodología de cálculo del factor topográfico, LS, integrado en los modelos RUSLE Y USPED. Aplicación al Arroyo del Lugar, Guadalajara (España). Tesis Doctoral. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes. Universidad Politécnica de Madrid. p. 646
- ~ Google Earth 2015. Imagen del área de la Sierra de San Miguelito fecha 24/02/2015, obtenida 30/05/2015. Coordenada extrema inferior izquierda 22° 03' 42.05" latitud norte y 101° 10' 35.87" longitud oeste. Coordenada extrema superior derecha 22° 09' 38.69" latitud norte y 101° 00' 35.28" longitud oeste. Image©2015Digital Globe.
- ~ Greene, R. S. B., Hairsine, P. B. 2004. Elementary processes of soil–water interaction and thresholds in soil surface dynamics: a review. *Earth Surface Processes and Landforms*, 29: 1077–1091. doi: 10.1002/esp.1103
- ~ Ibañez-Asensio, S., Moreno-Ramón, H., Gisbert-Blanquer, J. M. 2012. El factor C de la Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo (USLE). Departamento de Producción Vegetal, Universidad Politécnica de Valencia (UPV), pp. 10; descargado de: <https://riunet.upv.es/handle/10251/11260/browse?authority=1718&type=author>
- ~ INE-SEMARNAT (Instituto Nacional de Ecología y Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales) 2007. La conservación de suelos: un asunto de interés público. Gaceta ecológica. Publicación trimestral. Nueva época. Número 83. Trimestre abril-junio. ISSN 1405-2849. Instituto Nacional de Ecología y Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México pp. 73.
- ~ INEGI (Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática) 2014. Erosión de suelos en México. Boletín de prensa núm. 295/14. Aguascalientes, AGS. pp. 8.
- ~ INEGI (Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática) 2014a. Guía para la interpretación de cartografía de erosión del suelo escala 1:250 000, serie I. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México DF
- ~ INEGI (Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática) 2014b. Conjunto de datos de erosión de suelos, escala 1:250 000 serie I, continuo nacional. Elaboración de mapas: 2009-2013. Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- ~ ISO 3696 EN. 1987. Water for analytical use. Specification and test methods. International Organization for Standardization, Genève, Switzerland, 5 p. México DF
- ~ ISO 3696 EN: 1997. Water for analytical laboratory use - Specification and test methods. European committee for standardization. Brussels, Belgium.

- ~ ISO 11464: 1994. Soil quality. Pretreatment of samples for physico-chemical analyses. International Organization for Standardization, Genève, Switzerland. 9 p.
- ~ ISO 11265: 1994. Soil quality – Determination of the specific electrical conductivity. International Organization for Standardization, Genève, Switzerland. 4 p.
- ~ ISO 5725-2: 1994. Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results. Part 2. Basic method for the determination of repeatability and reproducibility of a standard measurement method. International Organization for Standardization, Genève, Switzerland, 42 p.
- ~ ISO 10390: 2005. Soil quality. Determination of pH. International Organization for Standardization, Genève, Switzerland, 5 p.
- ~ ISSS-ISRIC-FAO. 1994. World reference base for resources. O.C. Spaargaren (Comp.) Wageningen-Rome. p. 14-15
- ~ IUSS Grupo de Trabajo WRB. 2007. Base Referencial Mundial del Recurso Suelo. Primera actualización 2007. Informes sobre Recursos Mundiales de Suelos No. 103. FAO, Roma.
- ~ Jasso, M. D. L. C., Téllez, M. H., Plata, M. Á. B., Plata, R. F. 2009. Evaluación del riesgo de degradación del suelo en la cuenca del río Lerma, estado de México, utilizando plataformas SIG'S. Consulta digital, 2015: http://www.inegi.org.mx/eventos/2011/Conf_Ibero/doc/ET6_52_DELACRUZ.pdf
- ~ Johnson, C.W., Gembhart, K.A. 1982. Predicting sediment yields from Sagebrush rangelands. In: Agricultural Research Service (ed) Estimating soil erosion and sediment yields on rangelands. Agricultural reviews and manuals-W-26. Department of Agriculture, ARS, Tucson, AZ, pp 145–156
- ~ Julien, P. Y. 2010. Erosion and sedimentation. 2nd ed. Cambridge University Press. ISBN-13 978-0-511-71294-4 eBook (NetLibrary) pp. 371.
- ~ Labarthe-Hernández, G., Tristán-González, M. 1978. Cartografía Geológica Hoja San Luis Potosí: Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Instituto de Geología y Metalurgia, Folleto Técnico, 59, 41 p.
- ~ Labarthe-Hernández, G., Tristán-González, M. 1979, Cartografía Geológica Hoja Tepetate, S.L.P.: Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Instituto de Geología y Metalurgia, Folleto Técnico, No 66, 31 p.
- ~ Labarthe-Hernández, G., Tristán-González, M. y Aranda-Gómez, J.J. 1982. Revisión estratigráfica del Cenozoico de la parte central del Estado de San Luis Potosí: Universidad Autónoma de San Luis Potosí: Instituto de Geología y Metalurgia, Folleto Técnico No. 85, 205 p.
- ~ Labarthe-Hernández, G., Tristán-González, M., Aguillón-Robles, A., Jiménez-López, L.S., Romero, A. 1989. Cartografía geológica escala 1:50,000, de las hojas El Refugio y Mineral el Realito, Estados de San Luis Potosí y Guanajuato: Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Instituto de Geología, Folleto Técnico 112.
- ~ Labarthe-Hernández, G., Jiménez-López, L.S. 1992. Características físicas y estructura de lavas e ignimbrita riolíticas en la Sierra de San Miguelito, S.L.P.: Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Instituto de Geología, Folleto Técnico No.114.
- ~ Labarthe-Hernández y G., Jiménez-López, L. 1993. Geología del Domo Cerro Grande, Sierra de San Miguelito, S.L.P: Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Instituto de Geología, Folleto Técnico No. 117. 22 p.
- ~ Labarthe-Hernández, G. y Jiménez-López, L.S. 1994. Geología de la porción sureste de la Sierra de San Miguelito, S.L.P.: Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Folleto Técnico, 120, 33 p.
- ~ León-Arteta, R. 2001. Comparación de métodos de análisis mecánico de suelos. Terra, v.19, n 3. pp 219-225.
- ~ Llanas-Rivera, J., Velázquez-Chávez, M.A., Vega-Mojica, S. 2002. Estudio para el control de inundaciones en el Valle de San Luis Potosí. CONAGUA, Gerencia estatal en SLP, Subgerencia de Ingeniería. Proyecto e Informe por Obras y Proyectos Especiales, S.A. de C.V.
- ~ López-Doncel, R. 2003. La Formación Tamabra del Cretácico medio en la porción central del margen occidental de la Plataforma Valles-San Luis Potosí, centro-noreste de México. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, v. 20, núm. 1, 2003, p. 1-19.
- ~ López-Vicente, M., Poesen J., Navas A., Gaspar, L. 2011. Predicting runoff and sediment connectivity and soil erosion by water for different land use scenarios in the Spanish Pre-Pyrenees, Catena, doi:10.1016/j.catena.2011.01.001
- ~ Loredó-Ostí C., Beltrán-López, S., Moreno-Sánchez, F., Casiano Domínguez, M. 2007. Predicción de riesgo a la erosión hídrica a nivel microcuenca. Folleto Técnico No. 29. INIFAP-CIRNE-Campo Experimental San Luis. San Luis Potosí, S.L.P., México. pp. 66

- ~ Maldonado-Hernández, A. 2001. Evaluación del proceso de erosión hídrica, en la microcuenca de captación de la presa " La Estrella", en el municipio de Linares, Nuevo León. Tesis de Maestría. Facultad de Ciencias Forestales. Universidad Autónoma de Nuevo León. pp.54. Extraído a fecha de 27/11/2014 de: <https://www.eprints.uanl.mx/4907/1/1020145966.pdf>
- ~ McDowell, F. W. y Clabaugh, S. E. 1979, Ignimbrites of the Sierra Madre Occidental and their relation to the tectonic history of western Mexico: Geological Society of America, Special Paper, 180, p. 113-124.
- ~ McKenzie, D.C. (ed.). 1998. Soilpak for cotton growers, 3rd edition. NSW Agriculture: Orange, NSW.
- ~ Merritt, W.S., Letcher, R.A., Jakeman, A.J. 2003. A review of erosion and sediment transport models. *Environmental Modelling & Software* 18 (2003) pp. 761–799
- ~ Mitasova, H., Mitas, L., Brown, W. M., Johnston, D.M. 1999. Terrain Modelling and Soil Erosion Simulations for Fort Hood y Fort Polk Test Areas. US Army Construction Engineering Research Laboratories.
- ~ Mitasova, H., Brown, W. M., Johnston, D.M. 2001. Terrain Modelling and Soil Erosion Simulation-Final Report. US Army Engineering Research and development Center (ERCD)
- ~ Miyazaki, T. 2006. Water Flow in Soils. 2nd ed. CRC Press is an imprint of Taylor & Francis Group. ISBN-13: 978-0-8247-5325-2. pp. 418
- ~ Morgan, R.P.C. 2005. Soil erosion and conservation. 3rd ed. Blackwell Publishing Ltd. ISBN 1-4051-1781-8. pp. 316
- ~ Morgan, R.P.C. 1980. Field studies of sediment transport by overland flow. *Earth Surface Processes* 3: 307-16.
- ~ Morgan, R.P.C., Quinton, J.N., Smith, R.E., Govers, G., Poesen, J.W.A., Auerswald, K., Chischi, G., Torri, D., Styczen, M.E. 1998. The European Soil Erosion Model (EUROSEM): a dynamic approach for predicting sediment transport from fields and small catchments. *Earth Surface Processes and Landforms* 23: 527–44.
- ~ Moss, A. J., Grem, P., Hutka, J. 1982. Small channels: their formation, nature and significance. *Earth Surface Process and Landforms* 7: pp 401-415
- ~ Najm, Z., Keyhani, N., Rezaei, K., Nezamabad, A.N., Vaziri, S.H. 2013. Sediment yield and soil erosion assessment by using an empirical model of MPSIAC for Afjeh & Lavarak sub-watersheds, Iran. *Earth Science* 2013, 2(1) : 14-22. doi: 10.11648/j.earth.20130201.13
- ~ Nieto-Samaniego, A.F., Alaniz-Álvarez, S.A., Camprubí Cano, A. 2005. La Mesa Central de México: estratigrafía, estructura y evolución tectónica cenozoica. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Volumen Conmemorativo del Centenario, Temas Selectos de la Geología Mexicana, Tomo LVII, núm. 3, 2005, pp. 285-318.*
- ~ NOM-021-RECNAT (Norma Oficial Mexicana - Recursos Naturales) 2000. Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis. *Diario Oficial*, 31 de diciembre de 2002.
- ~ Oldeman, L.R. 1998. Guidelines for general assessment of the status of human-induced soil degradation. Working paper 88/4. International Soil Reference and Information Centre (ISRIC), Wageningen.
- ~ Owens, P.N., Collins, A.J. Eds. 2006. Soil erosion and sediment redistribution in river catchments. King's Lynn: Biddles Ltd.
- ~ Parehkar A., Behnam N., Shokrabadi M. 2013. An Investigation Survey on MPSIAC Model to Predict Sediment Yield in Iran. *Research Journal of Environmental and Earth Sciences* 5(6): 342-349, 2013 ISSN: 2041-0484; e-ISSN: 2041-0492
- ~ Peralta, J.M. 1993. Agentes erosivos y tipos de erosión. pp. 14 – 81. *Tecnologías de Conservación de suelos y agua. Programa de capacitación a agentes de extensión. INIA – Serie Platina Nº 46. Santiago. Chile. 132 p.*
- ~ Pimentel, D. 1993. World soil erosion and conservation. Ed. Cambridge University Press. Digitally printed version 2009. ISBN 978-0-521-10471-5. pp. 361
- ~ Poesen, J., Savat, J. 1981. Detachment and transportation of loose sediments by raindrop splash. Part II: Detachability and transportability measurements. *Catena* 8:19–41.
- ~ Poesen, J., Vandaele, K., van Wesemael, B. 1998. Gully erosion: importance and model implications. In: Boardman, J., Favis-Mortlock, D.T. (Eds.) *Modelling Soil Erosion by Water* Springer-Verlag, Berlin NATO-ASI Series, I-55:285-311.

- ~ PSIAC 1968. Report of the Water Management Subcommittee on Factors Affecting Sediment Yield in the Pacific Southwest Area and Selection and Evaluation of Measures for Reduction of Erosion and Sediment Yield. ASCE, 98, Report No. HY12.
- ~ Puente-Castillo, W.L. 2014. Estudio geotécnico y de peligro geomorfológico de una porción de la Sierra de San Miguelito, SLP. Tesis de Maestría. Instituto de Geología, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de San Luis Potosí. 183 p.
- ~ Renard, K.G., Ferreira V.A. 1993. RUSLE model description and database sensitivity. *Journal of Environmental Quality*. 22(3):458-466.
- ~ Richards, L.A. 1974. Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos. Noriega Editores-Editorial Limusa. México D.F., México.
- ~ Salvador-Sanchis, M.P., Torri, D., Borselli, L., Poesen, J., 2008. Climate Effects on Soil Erodibility. *Earth Surface Processes and Landforms* 33 (7), 1082–1097, <http://dx.doi.org/10.1002/esp.1604>.
- ~ Salvador Sanchis M.P., Torri D., Borselli L., Bryan R., Poesen J. , Yañez M. S., Cremer C. 2009. Rill and gully junctions: estimating the parameters of the width-discharge relation in the field. *Earth Surface Processes and Landform*, 34, 2023-2030.
- ~ Sarocchi, D. 2006. Analisis Textural del depósito de flujo de bloques y ceniza del 17 de julio de 1999 en el volcán de Colima, México. Tesis Doctoral. Universidad Nacional Autónoma de México. México.
- ~ SARH (Secretaría de Agricultura y Recursos Hídricos) 1977. Manual de conservación del suelo y agua. Instructivo. Colegio de postgraduados de Chapingo. SARH-SPP. Chapingo. México. pp. 248.
- ~ SEMARNAT (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales) 2010. Estrategia Nacional de Manejo Sustentable de Tierras, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México, 2010
- ~ SEMARNAT (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales) 2012. Compendio de Estadísticas Básicas, Edición 2012. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México.
- ~ SEMARNAT (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales) 2012. Informe de la Situación del Medio Ambiente, Edición 2012. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México.
- ~ SEMARNAT (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales) 2014. Diagnóstico del Programa de Manejo de Tierras para la Sustentabilidad Productiva. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México
- ~ SEMARNAT - CONAGUA - Servicio Meteorológico Nacional (SMN) - RED DE ESTACIONES CLIMATOLÓGICAS 2015. Estadísticas meteorológicas descargadas de: http://smn.cna.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=42&Itemid=75
- ~ SGM (Servicio Geológico Mexicano) 2007. Carta Geológica-Minera Tepetate F14-A83, S.L.P., Esc. 1:50,000. Ed 1ª. Mapa. Servicio Geológico Mexicano, Pachuca, Hgo., México
- ~ Sumner, M. E. 2000. *Handbook of Soil Science*. CRC Press LLC 2000 NW. ISBN 0-8493-3136-6, pp. 194
- ~ Torres-Aguilera, J. M., Rodríguez-Ríos, R., 2005. Hipótesis preliminares sobre el origen del vulcanismo bimodal en el Campo Volcánico de San Luis Potosí: XV Congreso Nacional de Geoquímica, Actas INAGEQ, vol. 11, No. 1.
- ~ Torres-Hernández, J. R. 2009. Origen y emplazamiento de las Ignimbritas Cantera y Panalillo del Campo Volcánico de San Luis Potosí: Universidad Autónoma de México, Posgrado en Ciencias de la Tierra, Instituto de Geofísica [Tesis Doctoral] 203 p.
- ~ Torres-Hernández, J. R., Siebe-Grabach, C., Aguillón-Robles, A., Rodríguez-Ríos, R. 2014. Geocronología y características geoquímicas de un conjunto de domos riolíticos terciarios en el Campo Volcánico de San Luis Potosí, México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, Volumen 66, núm. 1, 2014, p. 183-197
- ~ Torri, D., Sfalanga, M., del Sette, M. 1987. Splash detachment: runoff depth and soil cohesion. *Catena* 14: 149–55.
- ~ Torri D., Poesen J., Borselli L., Knapen A. 2006. Channel width – flow discharge relationships for rills and gullies. *Geomorphology*, 76, 273-279.
- ~ Tristán-González, M., Labarthe-Hernández, G., Aguirre-Díaz, G. J., Aguillón-Robles, A. 2008. Tectono-Volcanic control at fissure type events for the 28 Ma Panalillo Ignimbrite in the Villa de Reyes Graben, San Luis Potosí, México. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 3 (012026), 6 p.
- ~ Tristán-González, M., Aguillon-Robles, A., Barboza-Gudiño, J.R., Torres-Hernández, J.R., Bellom-Herve, López-Doncel, R. y Labarthe-Hernández, G. 2009. Geocronología y Distribución espacial del vulcanismo en el campo Volcánico de San Luis Potosí. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, V. 61, p. 17-34.

- ~ UNE 103 101 - 1995. Análisis granulométrico de suelos por tamizado. Ed. AENOR. D.L.: M 20664: 1995
- ~ UNE 103 102 - 1995. Análisis granulométrico de suelos finos por sedimentación. Método del densímetro
- ~ USDA-SSS (Soil Survey Staff) 1998. Keys to Soil Taxonomy. 8ª ed. Soil Survey Staff. Washington D.C. 326 p
- ~ USDAa. 1999. Soil Quality Test Kit Guide. Edición digital extraída de:
http://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/soils/health/assessment/?cid=nrcs142p2_053873
- ~ USDA- SCS (Soil Conservation Service) 1977. Erosion and sediment control in developing areas: Planning guidelines and design aids. USDA Printing, Columbia SC.
- ~ van de Graaff, R., Patterson, R.A. 2001. Explaining the Mysteries of Salinity, Sodicity, SAR and ESP in On-site Practice. Proceedings of On-site '01 Conference: Advancing On-site Wastewater Systems by R.A. Patterson & M.J. Jones (Eds). Published by Lanfax Laboratories, Armidale ISBN 0-9579438-0-6, p 361 - 368
- ~ Wischmeier, W.H., Johnson, C.B., Cross, B.V. 1971. A soil erodibility nomograph for farmland and construction sites. *Journal of Soil and Water Conservation* 26 (5), pp. 189–194.
- ~ Wischmeier, W.H., Smith, D.D. 1965. U.S. Department of Agriculture, *Agriculture HandBook* nº 282.
- ~ Wischmeier, W.H., Smith, D.D. 1978. Predicting Rainfall Erosion Losses: a Guide to Conservation Planning. U.S. Department of Agriculture, *Agriculture HandBook* nº 537. pp. 69
- ~ Zahra Najm, Nastaran Keyhani, Khalil Rezaei, Ali Naeimi Nezamabad, Seyed Hamid Vaziri 2013. Sediment Yield and Soil Erosion Assessment by Using an Empirical Model of MPSIAC for Afjeh & Lavarak Sub-Watersheds, Iran, *Earth Science*. Vol. 2, No. 1, pp. 14-22. doi: 10.11648/j.earth.20130201.13

II. Anexos

II.1. Anexo 1. Relación de resultados de cálculo

II.1.1. Granulometría Fracción gruesa. Cálculos

Se muestra el desarrollo de los cálculos para obtener la granulometría de la fracción gruesa.

▪ **MC_01**

Muestra	ϕ (Phi)	Tamaño de grano	Wf_x	%Frt	%Afrt	%Apas
MC_01_A1	-4	16 mm	0	0	0	100
Wm	-3	8 mm	20,92	1,531938576	1,531938576	98,46806142
1367,84	-2	4 mm	36,21	2,651601139	4,183539715	95,81646028
Wn _f	-1	2 mm	27,62	2,022568999	6,206108715	93,79389129
1365,59	0	1 mm	91,73	6,717243096	12,92335181	87,07664819
Pérdida	1	0.5 mm	129,75	9,501387679	22,42473949	77,57526051
2,25	2	250 μ m	367,5	26,91144487	49,33618436	50,66381564
% de Perd.	3	125 μ m	184,84	13,53554141	62,87172577	37,12827423
0,164492923	4	63 μ m	320,39	23,46165394	86,33337971	13,66662029
	Tarja	<63 μ m	186,63	13,66662029	100	0
MC_01_A2	-4	16 mm	0	0	0	100
Wm	-3	8 mm	12,05	0,979937707	0,979937707	99,02006229
1230,57	-2	4 mm	34,79	2,829214342	3,809152049	96,19084795
Wn _f	-1	2 mm	27,95	2,272967544	6,082119593	93,91788041
1229,67	0	1 mm	78,8	6,408223344	12,49034294	87,50965706
Pérdida	1	0.5 mm	135,92	11,05337204	23,54371498	76,45628502
0,9	2	250 μ m	328,08	26,68032887	50,22404385	49,77595615
% de Perd.	3	125 μ m	165,91	13,49223775	63,7162816	36,2837184
0,073136839	4	63 μ m	305,45	24,83999772	88,55627933	11,44372067
	Tarja	<63 μ m	140,72	11,44372067	100	0
MC_01_A3	-4	16 mm	0	0	0	100
Wm	-3	8 mm	13,63	1,035879586	1,035879586	98,96412041
1316,77	-2	4 mm	28,63	2,17587913	3,211758715	96,78824128
Wn _f	-1	2 mm	38,52	2,927518829	6,139277544	93,86072246
1315,79	0	1 mm	132,31	10,05555598	16,19483352	83,80516648
Pérdida	1	0.5 mm	185,73	14,11547435	30,31030788	69,68969212
0,98	2	250 μ m	282,37	21,46011142	51,77041929	48,22958071
% de Perd.	3	125 μ m	158,92	12,07791517	63,84833446	36,15166554
0,074424539	4	63 μ m	349,43	26,55666938	90,40500384	9,594996162
	Tarja	<63 μ m	126,25	9,594996162	100	0
MC_01_B4	-4	16 mm	0	0	0	100
Wm	-3	8 mm	1,09	0,079022155	0,079022155	99,92097784
1381,63	-2	4 mm	0,88	0,063797703	0,142819858	99,85718014
Wn _f	-1	2 mm	2,45	0,177618606	0,320438464	99,67956154
1379,36	0	1 mm	21,59	1,565218652	1,885657116	98,11434288
Pérdida	1	0.5 mm	83,68	6,066581603	7,952238719	92,04776128
2,27	2	250 μ m	288,51	20,91622202	28,86846074	71,13153926
% de Perd.	3	125 μ m	172,02	12,47100104	41,33946178	58,66053822
0,155613297	4	63 μ m	588,81	42,68718826	84,02665004	15,97334996
	Tarja	<63 μ m	220,33	15,97334996	100	0
MC_01_C1	-4	16 mm	0	0	0	100
Wm	-3	8 mm	15,08	1,345191476	1,345191476	98,65480852
1121,89	-2	4 mm	58,73	5,238932054	6,584123529	93,41587647
Wn _f	-1	2 mm	73,04	6,515436697	13,09956023	86,90043977
1121,03	0	1 mm	224,57	20,03247014	33,13203036	66,86796964
Pérdida	1	0.5 mm	340,79	30,39972168	63,53175205	36,46824795
0,86	2	250 μ m	285,18	25,43910511	88,97085716	11,02914284
% de Perd.	3	125 μ m	44,97	4,011489434	92,98234659	7,017653408
0,076656357	4	63 μ m	56,35	5,026627298	98,00897389	1,99102611
	Tarja	<63 μ m	22,32	1,99102611	100	0

▪ TP_01

Muestra	ϕ (Phi)	Tamaño de grano	Wf_x	%Frt	%Afrt	%Apas
TP_01_A1	-4	16 mm	0	0	0	100
Wm	-3	8 mm	6,53	0,53945988	0,53945988	99,46054012
1212,29	-2	4 mm	45,83	3,78613266	4,3259254	95,67440746
Wn _f	-1	2 mm	46,18	3,81504705	8,14063959	91,85936041
1210,47	0	1 mm	143,62	11,8648128	20,0054524	79,99454757
Pérdida	1	0.5 mm	147	12,1440432	32,1494957	67,85050435
1,82	2	250 μ m	213,76	17,6592563	49,808752	50,19124803
% de Perd.	3	125 μ m	84,71	6,99810817	56,8068601	43,19313985
0,15012909	4	63 μ m	307,12	25,371963	82,1788231	17,8211769
	Tarja	<63 μ m	215,72	17,8211769	100	0
TP_01_A2	-4	16 mm	0	0	0	100
Wm	-3	8 mm	15	1,1649852	1,1649852	98,8350148
1289,6	-2	4 mm	48,88	3,79629845	4,96128366	95,03871634
Wn _f	-1	2 mm	56,21	4,36558789	9,32687155	90,67312845
1287,57	0	1 mm	142,44	11,0626995	20,3895711	79,61042895
Pérdida	1	0.5 mm	189,49	14,7168698	35,1064408	64,89355919
2,03	2	250 μ m	242,41	18,8269376	53,9333784	46,06662162
% de Perd.	3	125 μ m	87,59	6,80273694	60,7361153	39,26388468
0,15741315	4	63 μ m	329,78	25,6125881	86,3487034	13,65129663
	Tarja	<63 μ m	175,77	13,6512966	100	0
TP_01_B6	-4	16 mm	0	0	0	100
Wm	-3	8 mm	9,32	0,69074388	0,69074388	99,30925612
1351,97	-2	4 mm	14,78	1,09540715	1,78615103	98,21384897
Wn _f	-1	2 mm	16,3	1,20806066	2,99421168	97,00578832
1349,27	0	1 mm	45,04	3,33810134	6,33231303	93,66768697
Pérdida	1	0.5 mm	43,17	3,19950788	9,53182091	90,46817909
2,7	2	250 μ m	84,81	6,28562111	15,817442	84,18255798
% de Perd.	3	125 μ m	132,23	9,80011414	25,6175562	74,38244384
0,19970857	4	63 μ m	684,2	50,7089019	76,326458	23,67354199
	Tarja	<63 μ m	319,42	23,673542	100	0
TP_01_C2	-4	16 mm	0	0	0	100
Wm	-3	8 mm	10,89	1,58591463	1,58591463	98,41408537
687,04	-2	4 mm	81,29	11,838292	13,4242067	86,57579332
Wn _f	-1	2 mm	67,65	9,85189392	23,2761006	76,7238994
686,67	0	1 mm	117,78	17,1523439	40,4284445	59,57155548
Pérdida	1	0.5 mm	84,84	12,3552798	52,7837244	47,21627565
0,37	2	250 μ m	99,63	14,5091529	67,2928772	32,70712278
% de Perd.	3	125 μ m	37,88	5,51647808	72,8093553	27,19064471
0,05385422	4	63 μ m	72,79	10,600434	83,4097893	16,59021073
	Tarja	<63 μ m	113,92	16,5902107	100	0
TP_01_D4	-4	16 mm	0	0	0	100
Wm	-3	8 mm	0	0	0	100
1380,89	-2	4 mm	1,85	0,13517463	0,13517463	99,86482537
Wn _f	-1	2 mm	4,7	0,34341663	0,47859126	99,52140874
1380,8	0	1 mm	39,99	2,92196405	3,40055531	96,59944469
Pérdida	1	0.5 mm	88,92	6,49715037	9,89770568	90,10229432
0,09	2	250 μ m	380,16	27,7772907	37,6749963	62,32500365
% de Perd.	3	125 μ m	164,65	12,0305422	49,7055385	50,29446149
0,00651754	4	63 μ m	374,88	27,391495	77,0970335	22,90296654
	Tarja	<63 μ m	313,45	22,9029665	100	0

▪ TSA_01

Muestra	ϕ (Phi)	Tamaño de grano	Wf_x	%Frt	%Afrt	%Apas
TSA_01_A1	-4	16 mm	0	0	0	100
Wm	-3	8 mm	4,93	0,34163514	0,34163514	99,65836486
1445,42	-2	4 mm	16,12	1,11707067	1,45870581	98,54129419
Wn _f	-1	2 mm	14,82	1,02698432	2,48569013	97,51430987
1443,06	0	1 mm	36,58	2,53489113	5,02058126	94,97941874
Pérdida	1	0.5 mm	180,21	12,4880462	17,5086275	82,4913725
2,36	2	250 μ m	235,41	16,313251	33,8218785	66,17812149
% de Perd.	3	125 μ m	135,53	9,39184788	43,2137264	56,78627361
0,16327434	4	63 μ m	517,61	35,8689174	79,0826438	20,91735617
	Tarja	<63 μ m	301,85	20,9173562	100	0
TSA_01_A3	-4	16 mm	0	0	0	100
Wm	-3	8 mm	7,72	0,5611607	0,5611607	99,4388393
1378,06	-2	4 mm	17,85	1,2975024	1,8586631	98,1413369
Wn _f	-1	2 mm	16,97	1,23353589	3,09219899	96,90780101
1375,72	0	1 mm	163,57	11,8897741	14,9819731	85,01802692
Pérdida	1	0.5 mm	337,78	24,5529614	39,5349344	60,46506557
2,34	2	250 μ m	313,63	22,7975169	62,3324514	37,66754863
% de Perd.	3	125 μ m	86,81	6,31015032	68,6426017	31,35739831
0,16980393	4	63 μ m	109,12	7,9318466	76,5744483	23,42555171
	Tarja	<63 μ m	322,27	23,4255517	100	0
TSA_01_B1	-4	16 mm	0	0	0	100
Wm	-3	8 mm	9,52	0,79351849	0,79351849	99,20648151
1201,78	-2	4 mm	31,02	2,58560331	3,3791218	96,6208782
Wn _f	-1	2 mm	36,95	3,07988531	6,4590071	93,5409929
1199,72	0	1 mm	90,02	7,50341746	13,9624246	86,03757543
Pérdida	1	0.5 mm	177,56	14,80012	28,7625446	71,23745541
2,06	2	250 μ m	216,07	18,0100357	46,7725803	53,22741973
% de Perd.	3	125 μ m	81,13	6,76241123	53,5349915	46,4650085
0,1714124	4	63 μ m	329,08	27,4297336	80,9647251	19,0352749
	Tarja	<63 μ m	228,37	19,0352749	100	0
TSA_01_B3	-4	16 mm	0	0	0	100
Wm	-3	8 mm	12,61	0,94829142	0,94829142	99,05170858
1331,53	-2	4 mm	11,12	0,83624113	1,78453255	98,21546745
Wn _f	-1	2 mm	12,09	0,90918662	2,69371917	97,30628083
1329,76	0	1 mm	59,33	4,46170738	7,15542654	92,84457346
Pérdida	1	0.5 mm	269,58	20,2728312	27,4282577	72,57174227
1,77	2	250 μ m	399,48	30,0415113	57,469769	42,53023102
% de Perd.	3	125 μ m	105,58	7,93977861	65,4095476	34,59045241
0,13292979	4	63 μ m	257,56	19,3689087	84,7784563	15,22154374
	Tarja	<63 μ m	202,41	15,2215437	100	0
TSA_01_B4	-4	16 mm	0	0	0	100
Wm	-3	8 mm	2,18	0,18123774	0,18123774	99,81876226
1203,27	-2	4 mm	7,37	0,61271657	0,79395431	99,20604569
Wn _f	-1	2 mm	4,77	0,39656147	1,19051578	98,80948422
1201,55	0	1 mm	32,25	2,6811546	3,87167038	96,12832962
Pérdida	1	0.5 mm	194,62	16,1800406	20,051711	79,94828905
1,72	2	250 μ m	344,22	28,6172725	48,6689834	51,33101659
% de Perd.	3	125 μ m	117,04	9,73030494	58,3992884	41,60071165
0,14294381	4	63 μ m	233,38	19,4024143	77,8017026	22,19829736
	Tarja	<63 μ m	267,01	22,1982974	100	0

▪ MC_02

Muestra	ϕ (Phi)	Tamaño de grano	Wf_x	%Frt	%Afrt	%Apas
MC_02_A1	-4	16 mm	12,28	1,11336767	1,11336767	98,88663233
Wm	-3	8 mm	13,1	1,18771306	2,30108073	97,69891927
1105,27	-2	4 mm	22,87	2,07351128	4,37459201	95,62540799
Wn _f	-1	2 mm	27,8	2,52049032	6,89508232	93,10491768
1102,96	0	1 mm	91,65	8,30945819	15,2045405	84,79545949
Pérdida	1	0.5 mm	164,08	14,8763328	30,0808733	69,91912671
2,31	2	250 μ m	310	28,106187	58,1870603	41,81293973
% de Perd.	3	125 μ m	109,37	9,9160441	68,1031044	31,89689563
0,20899871	4	63 μ m	190,11	17,2363458	85,3394502	14,66054979
	Tarja	<63 μ m	161,7	14,6605498	100	0
MC_02_A2	-4	16 mm	0	0	0	100
Wm	-3	8 mm	5,62	0,44761973	0,44761973	99,55238027
1257,41	-2	4 mm	24,18	1,92587991	2,37349964	97,62650036
Wn _f	-1	2 mm	31,26	2,48978519	4,86328483	95,13671517
1255,53	0	1 mm	92,2	7,3435123	12,2067971	87,79320287
Pérdida	1	0.5 mm	176,07	14,0235598	26,2303569	73,7696431
1,88	2	250 μ m	394,38	31,4114358	57,6417927	42,35820729
% de Perd.	3	125 μ m	130,31	10,3788838	68,0206765	31,97932347
0,14951368	4	63 μ m	221,47	17,6395626	85,6602391	14,3397609
	Tarja	<63 μ m	180,04	14,3397609	100	0
MC_02_A3	-4	16 mm	0	0	0	100
Wm	-3	8 mm	5,92	0,51701702	0,51701702	99,48298298
1146,28	-2	4 mm	17,11	1,49428399	2,01130101	97,98869899
Wn _f	-1	2 mm	24,26	2,11872178	4,13002279	95,86997721
1145,03	0	1 mm	119,9	10,4713414	14,6013642	85,39863584
Pérdida	1	0.5 mm	250,35	21,864056	36,4654201	63,53457988
1,25	2	250 μ m	270,78	23,6482887	60,1137088	39,88629119
% de Perd.	3	125 μ m	101,37	8,85304315	68,966752	31,03324804
0,1090484	4	63 μ m	241,15	21,0605836	90,0273355	9,972664472
	Tarja	<63 μ m	114,19	9,97266447	100	0
MC_02_B4	-4	16 mm	0	0	0	100
Wm	-3	8 mm	1,41	0,12289295	0,12289295	99,87710705
1147,07	-2	4 mm	6,22	0,54212352	0,66501647	99,33498353
Wn _f	-1	2 mm	4,28	0,37303676	1,03805324	98,96194676
1145,2	0	1 mm	44,48	3,87679328	4,91484651	95,08515349
Pérdida	1	0.5 mm	234,47	20,4359649	25,3508114	74,64918856
1,87	2	250 μ m	362,14	31,5634424	56,9142538	43,08574616
% de Perd.	3	125 μ m	118,42	10,3212648	67,2355187	32,76448132
0,16302405	4	63 μ m	221,89	19,3395157	86,5750344	13,42496557
	Tarja	<63 μ m	154,03	13,4249656	100	0

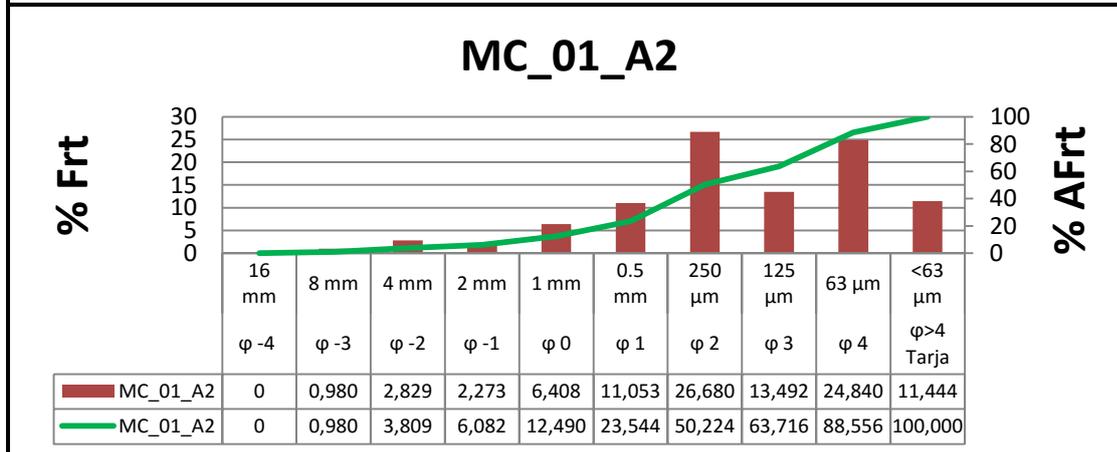
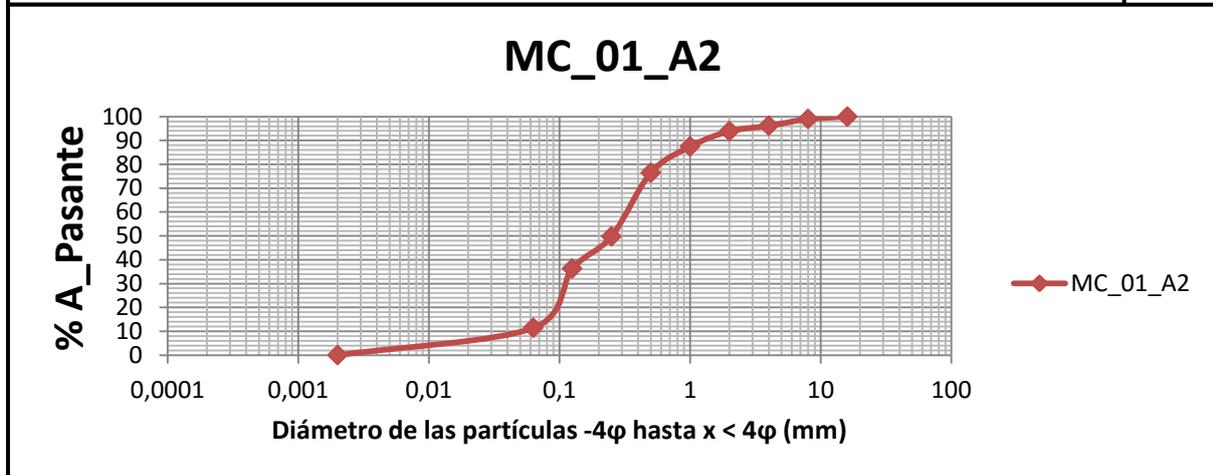
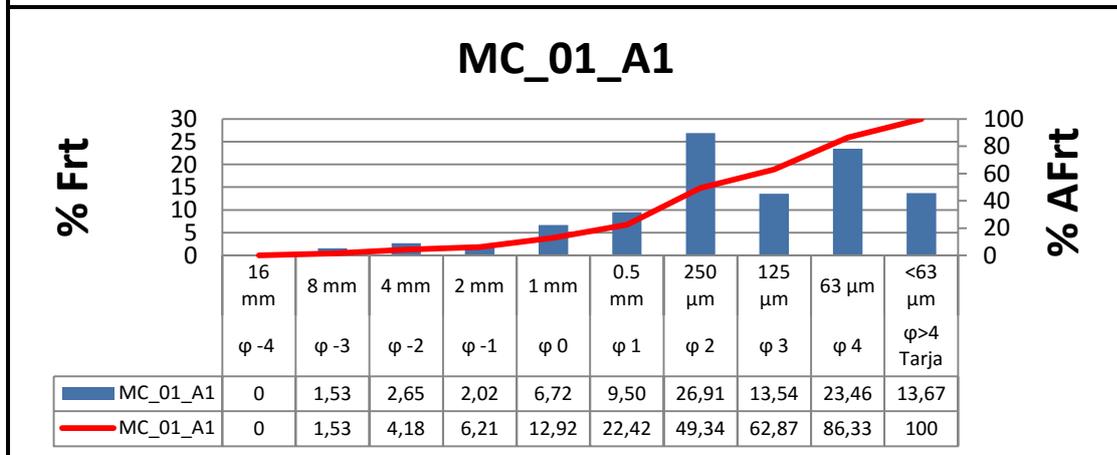
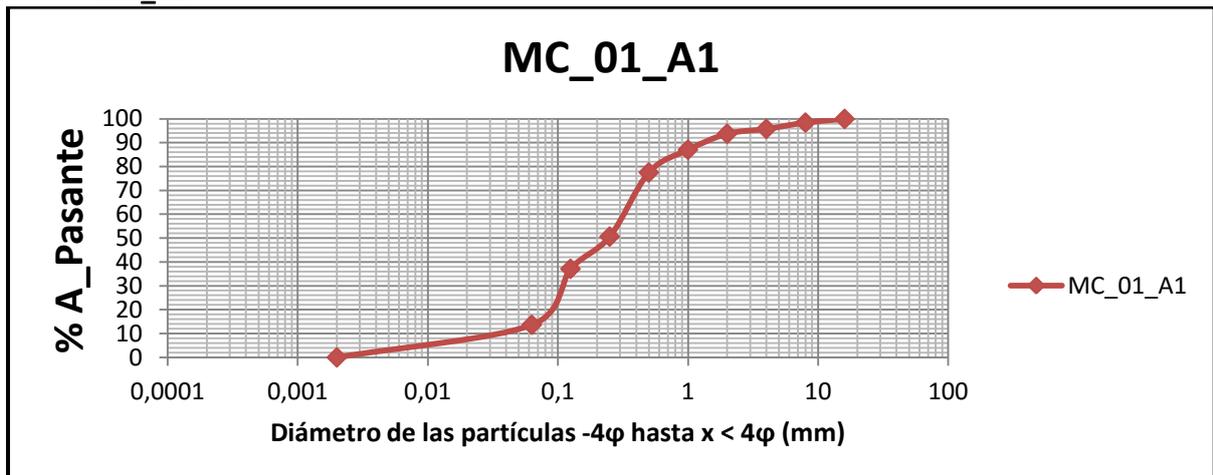
▪ TP_02

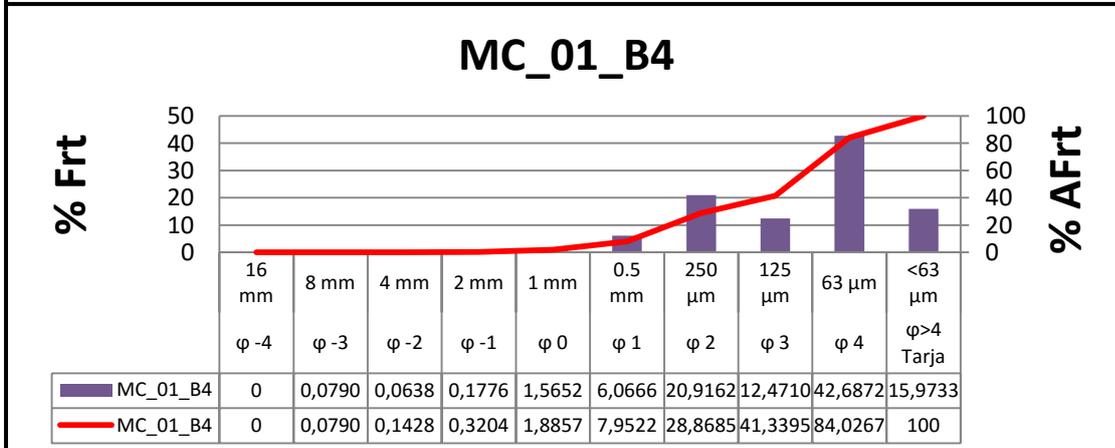
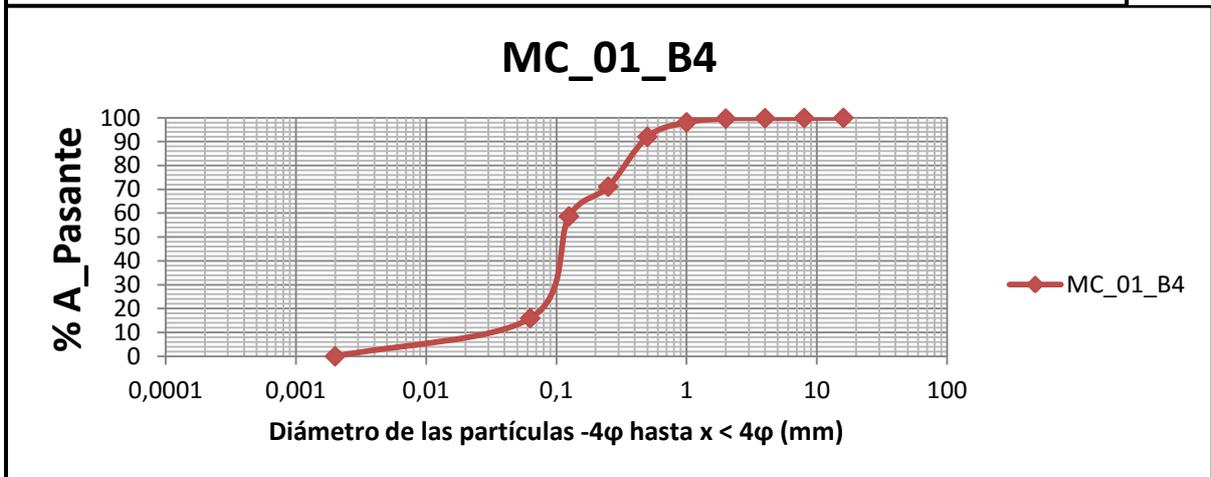
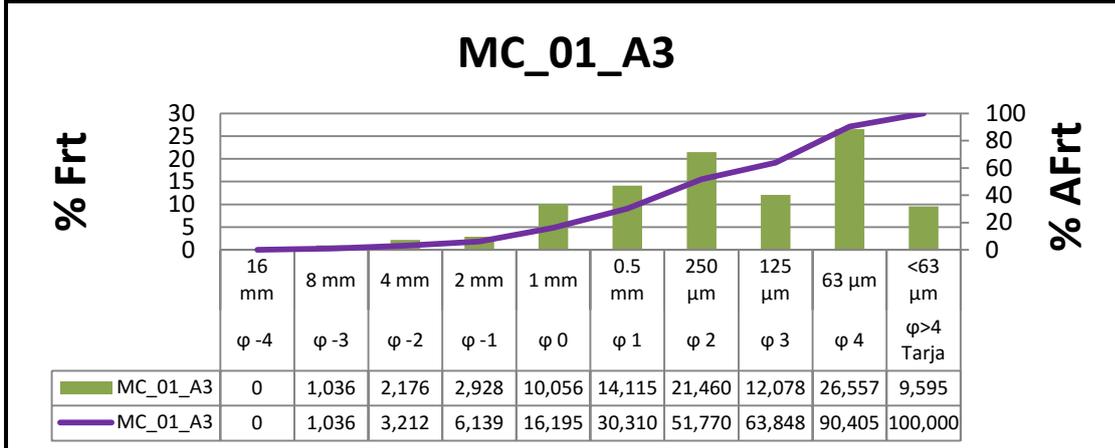
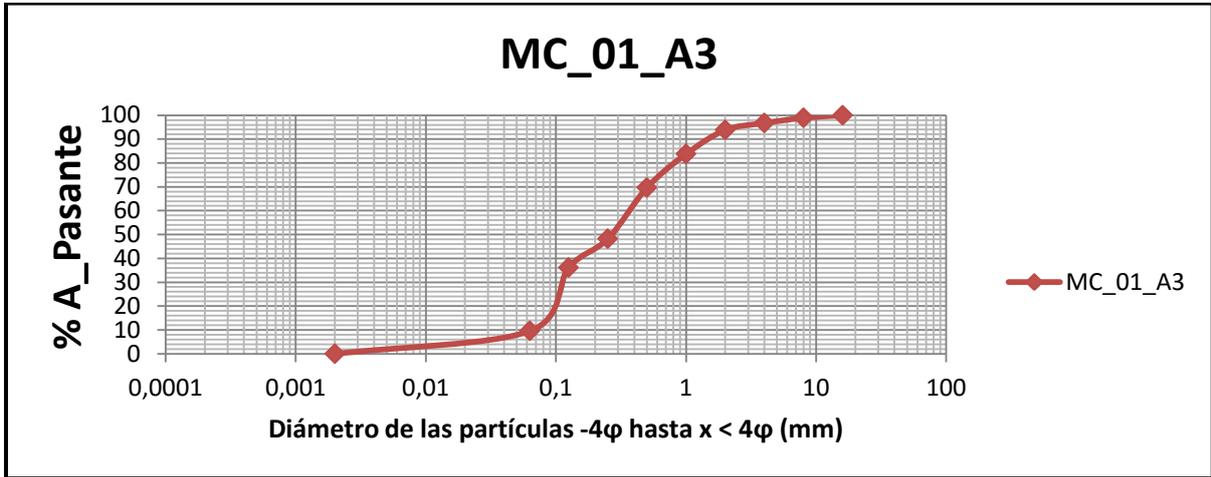
Muestra	ϕ (Phi)	Tamaño de grano	Wf_x	%Frt	%Afrt	%Apas
TP_02_A1	-4	16 mm	7,03	0,60718604	0,60718604	99,39281396
Wm	-3	8 mm	6,96	0,60114009	1,20832614	98,79167386
1160,23	-2	4 mm	30,37	2,62307825	3,83140439	96,16859561
Wn _f	-1	2 mm	34,07	2,94264985	6,77405424	93,22594576
1157,8	0	1 mm	70,56	6,09431681	12,868371	87,13162895
Pérdida	1	0.5 mm	170,86	14,7572983	27,6256694	72,37433063
2,43	2	250 μ m	265,32	22,9158749	50,5415443	49,45845569
% de Perd.	3	125 μ m	91,07	7,86577993	58,4073242	41,59267576
0,20944123	4	63 μ m	229,71	19,8402142	78,2475384	21,75246157
	Tarja	<63 μ m	251,85	21,7524616	100	0
TP_02_A3	-4	16 mm	14,5	1,33876225	1,33876225	98,66123775
Wm	-3	8 mm	5,56	0,51334607	1,85210832	98,14789168
1084,55	-2	4 mm	23,09	2,13186346	3,98397178	96,01602822
Wn _f	-1	2 mm	34,92	3,2241088	7,20808058	92,79191942
1083,09	0	1 mm	108,71	10,0370237	17,2451043	82,75489572
Pérdida	1	0.5 mm	127,59	11,7801845	29,0252888	70,97471124
1,46	2	250 μ m	303,93	28,0613799	57,0866687	42,9133313
% de Perd.	3	125 μ m	96,91	8,94754822	66,0342169	33,96578308
0,13461804	4	63 μ m	186,09	17,1813977	83,2156146	16,78438542
	Tarja	<63 μ m	181,79	16,7843854	100	0
TP_02_A4	-4	16 mm	0	0	0	100
Wm	-3	8 mm	2,39	0,22355252	0,22355252	99,77644748
1067,99	-2	4 mm	7,77	0,72677953	0,95033205	99,04966795
Wn _f	-1	2 mm	13,61	1,27303339	2,22336545	97,77663455
1067,29	0	1 mm	48,07	4,4963053	6,71967075	93,28032925
Pérdida	1	0.5 mm	99,71	9,32653634	16,0462071	83,95379291
0,7	2	250 μ m	252,45	23,6133196	39,6595267	60,3404733
% de Perd.	3	125 μ m	123,64	11,5648676	51,2243944	48,77560565
0,06554368	4	63 μ m	367,71	34,3943504	85,6187447	14,38125526
	Tarja	<63 μ m	153,75	14,3812553	100	0

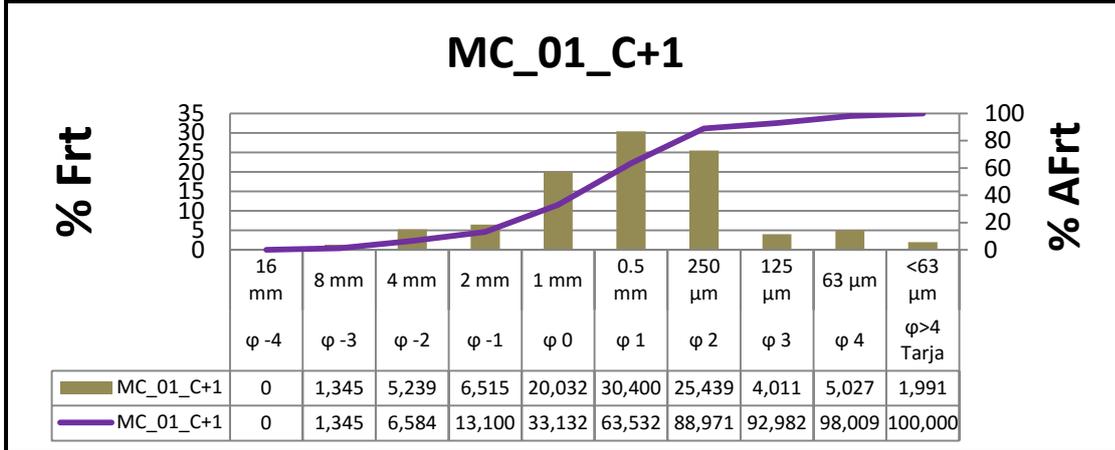
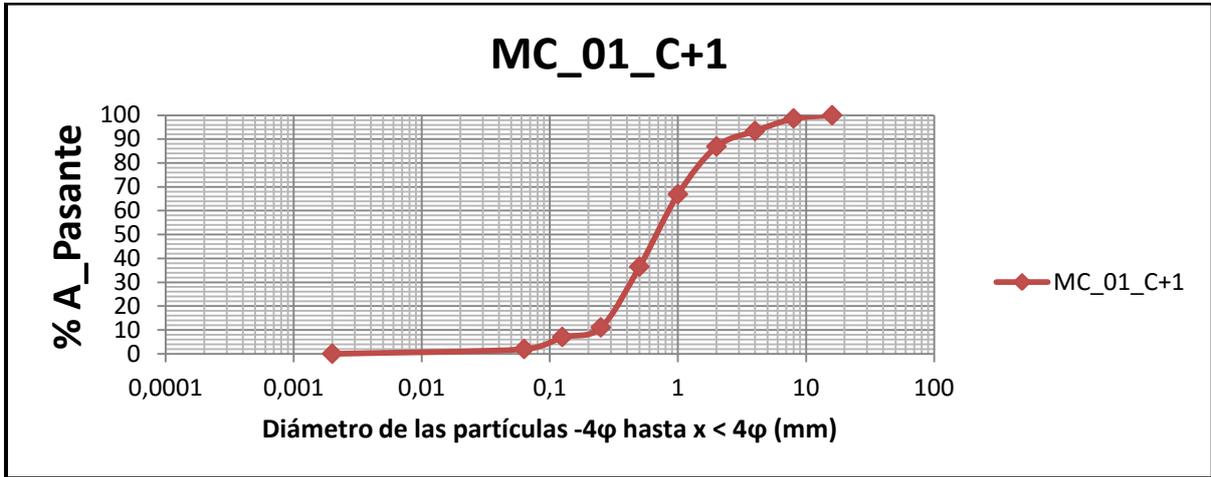
▪ TSA_02

Muestra	ϕ (Phi)	Tamaño de grano	Wf_x	%Frt	%Afrt	%Apas
TSA_02_A1	-4	16 mm	0	0	0	100
Wm	-3	8 mm	3,26	0,30234456	0,30234456	99,69765544
1079,96	-2	4 mm	15,48	1,43567295	1,73801751	98,26198249
Wn_f	-1	2 mm	12,16	1,12776376	2,86578127	97,13421873
1078,24	0	1 mm	59,34	5,50341297	8,36919424	91,63080576
Pérdida	1	0.5 mm	92,39	8,56859326	16,9377875	83,06221249
1,72	2	250 μ m	257	23,8351387	40,7729263	59,22707375
% de Perd.	3	125 μ m	90,41	8,38496068	49,1578869	50,84211307
0,15926516	4	63 μ m	344,03	31,9066256	81,0645125	18,93548746
	Tarja	<63 μ m	204,17	18,9354875	100	0
TSA_02_A2	-4	16 mm	0	0	0	100
Wm	-3	8 mm	12,59	1,15456921	1,15456921	98,84543079
1092,06	-2	4 mm	15,49	1,42051447	2,57508368	97,42491632
Wn_f	-1	2 mm	18,67	1,71213719	4,28722087	95,71277913
1090,45	0	1 mm	46,34	4,24962172	8,53684259	91,46315741
Pérdida	1	0.5 mm	109,14	10,008712	18,5455546	81,45444541
1,61	2	250 μ m	303,47	27,829795	46,3753496	53,62465037
% de Perd.	3	125 μ m	105,9	9,71158696	56,0869366	43,91306341
0,1474278	4	63 μ m	319,81	29,328259	85,4151956	14,58480444
	Tarja	<63 μ m	159,04	14,5848044	100	0
TSA_02_A3	-4	16 mm	8,61	0,74624278	0,74624278	99,25375722
Wm	-3	8 mm	8,56	0,7419092	1,48815199	98,51184801
1155,55	-2	4 mm	22,18	1,92237688	3,41052887	96,58947113
Wn_f	-1	2 mm	21,73	1,88337465	5,29390352	94,70609648
1153,78	0	1 mm	54,68	4,73920505	10,0331086	89,96689144
Pérdida	1	0.5 mm	116,08	10,0608435	20,0939521	79,90604795
1,77	2	250 μ m	320,54	27,7817262	47,8756782	52,12432179
% de Perd.	3	125 μ m	147,67	12,7988005	60,6744787	39,32552133
0,15317381	4	63 μ m	302,61	26,2277037	86,9021824	13,09781761
	Tarja	<63 μ m	151,12	13,0978176	100	0
TSA_02_A4	-4	16 mm	0	0	0	100
Wm	-3	8 mm	2,79	0,2583764	0,2583764	99,7416236
1085,09	-2	4 mm	3,91	0,36209739	0,62047378	99,37952622
Wn_f	-1	2 mm	4,64	0,42970125	1,05017503	98,94982497
1082,54	0	1 mm	36,67	3,39593636	4,44611139	95,55388861
Pérdida	1	0.5 mm	137,55	12,7382342	17,1843455	82,81565446
2,55	2	250 μ m	313,44	29,0270601	46,2114056	53,7885944
% de Perd.	3	125 μ m	113,04	10,4684114	56,679817	43,32018299
0,23500355	4	63 μ m	308,22	28,5436462	85,2234632	14,77653683
	Tarja	<63 μ m	159,56	14,7765368	100	0

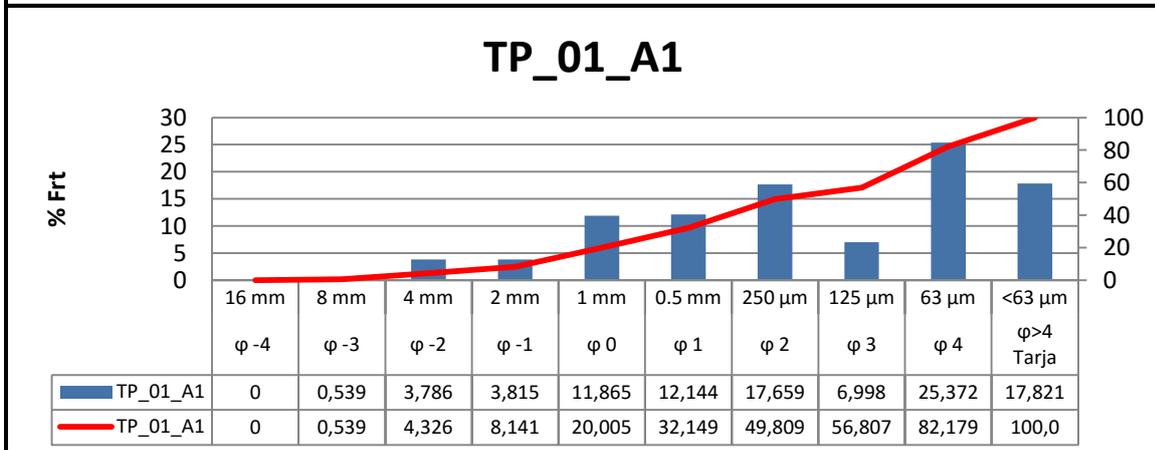
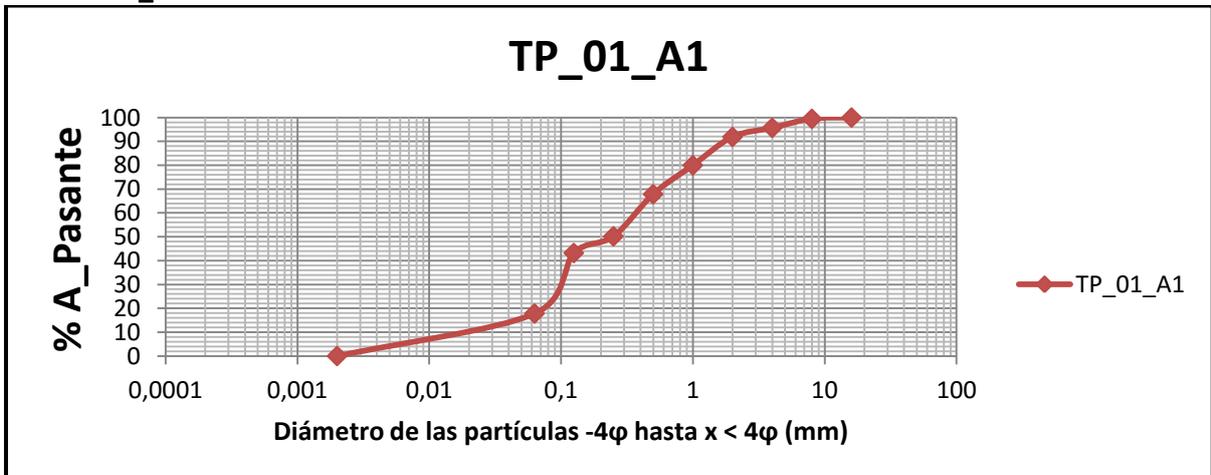
- **Curvas Granulométricas y Gráficas Fracción Gruesa:** Estos cálculos se materializaron en las siguientes gráficas, de la curva granulométrica y el porcentaje acumulado de fracciones.
 - **MC_01**

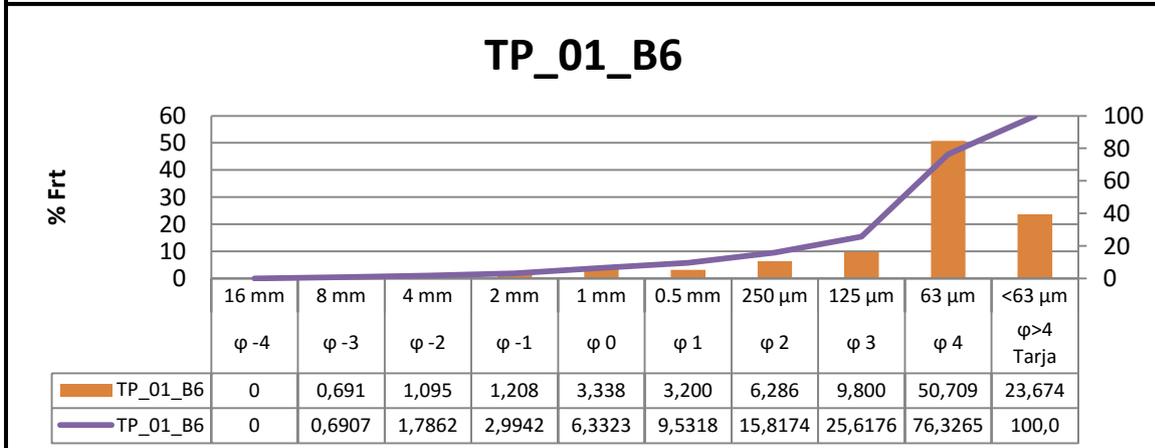
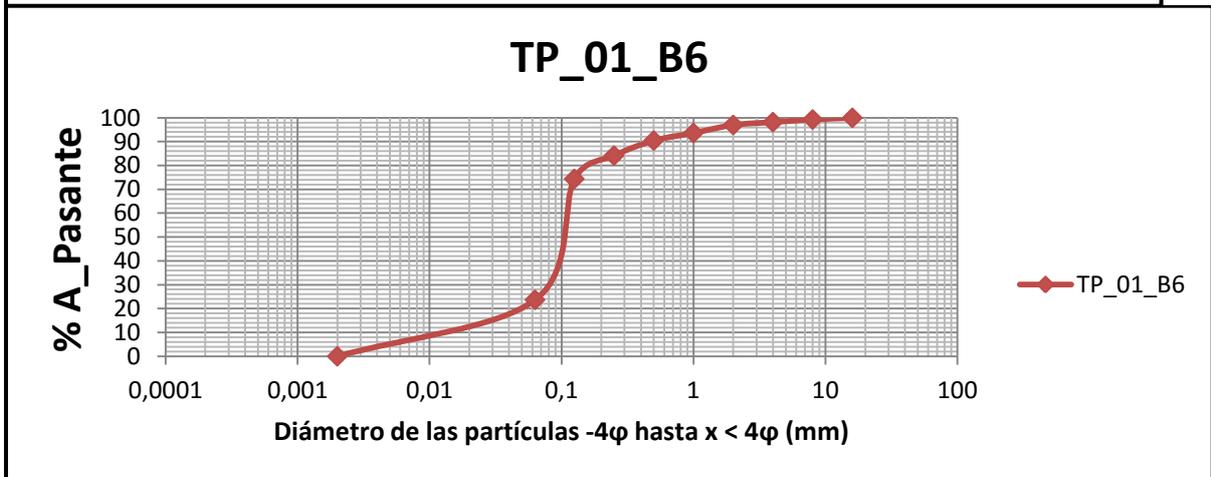
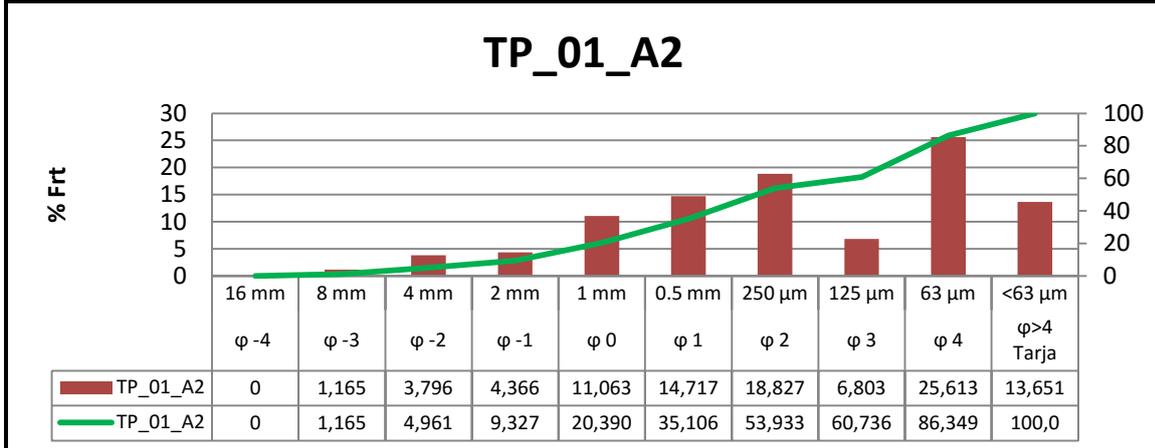
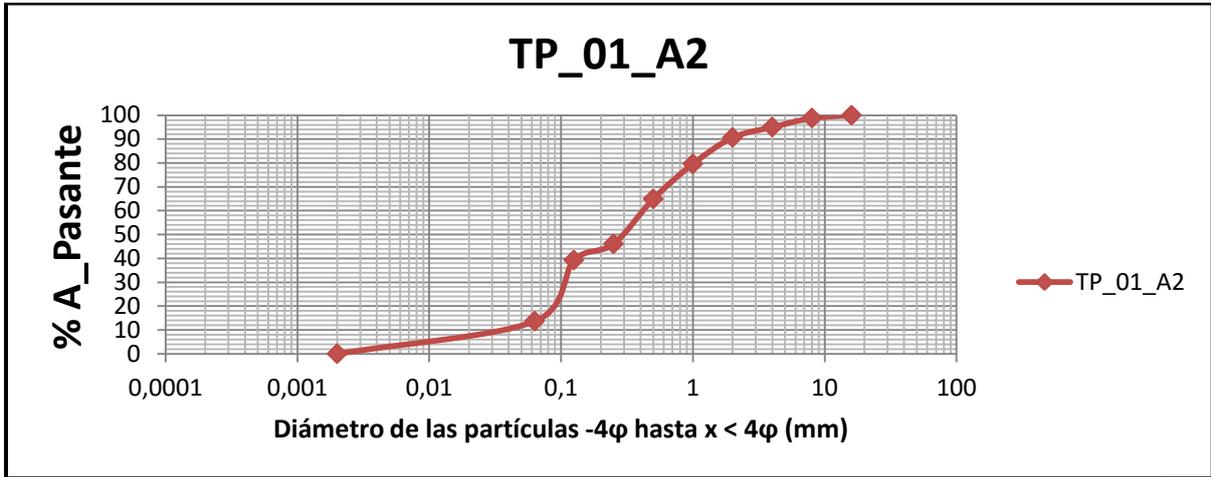


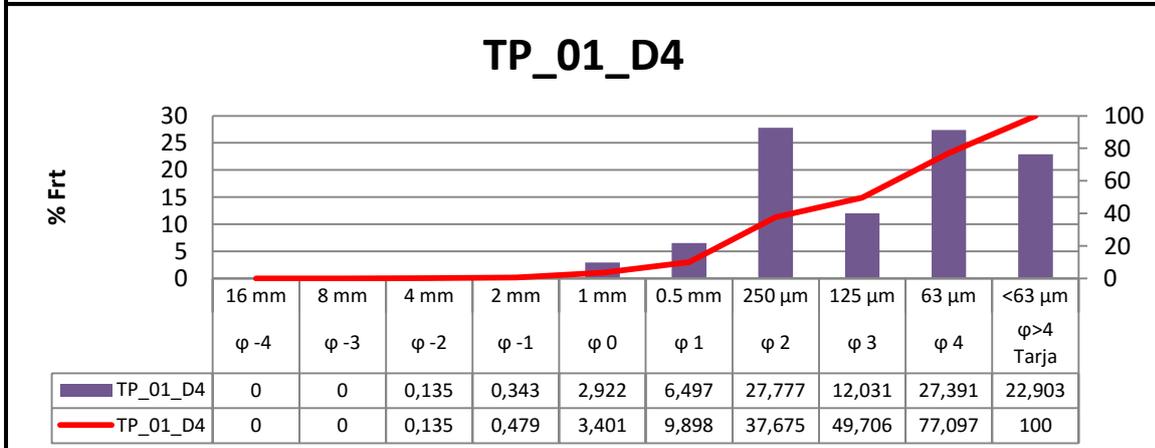
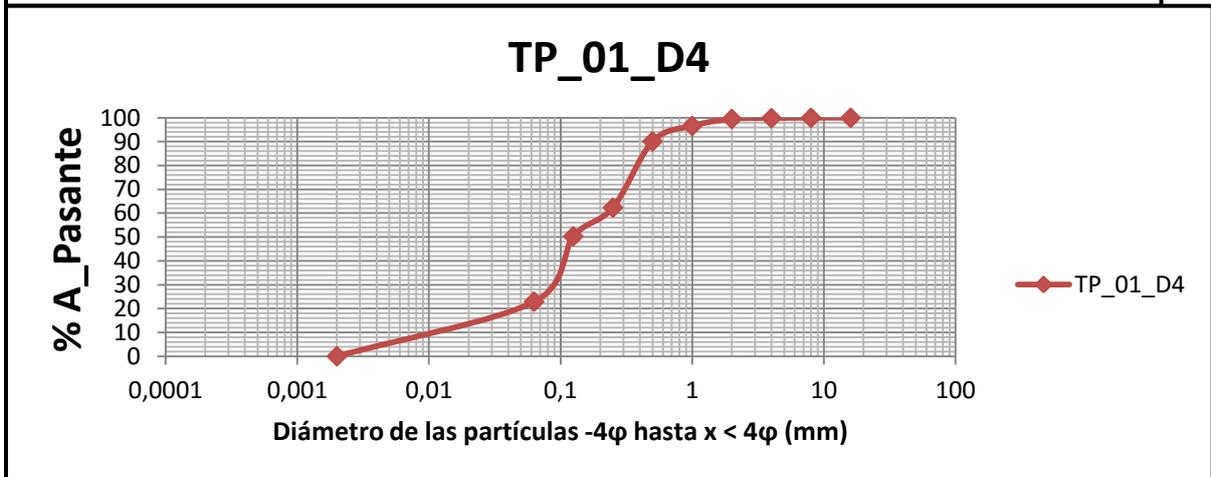
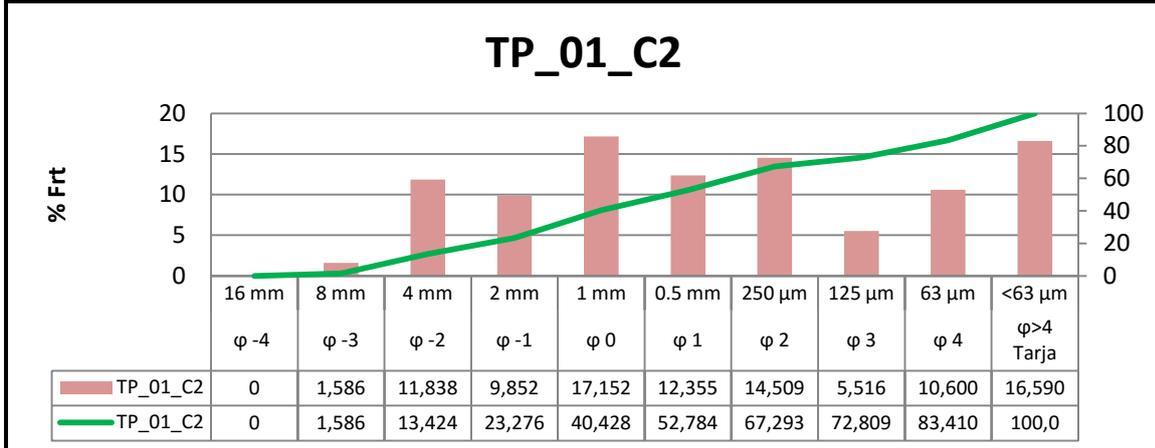
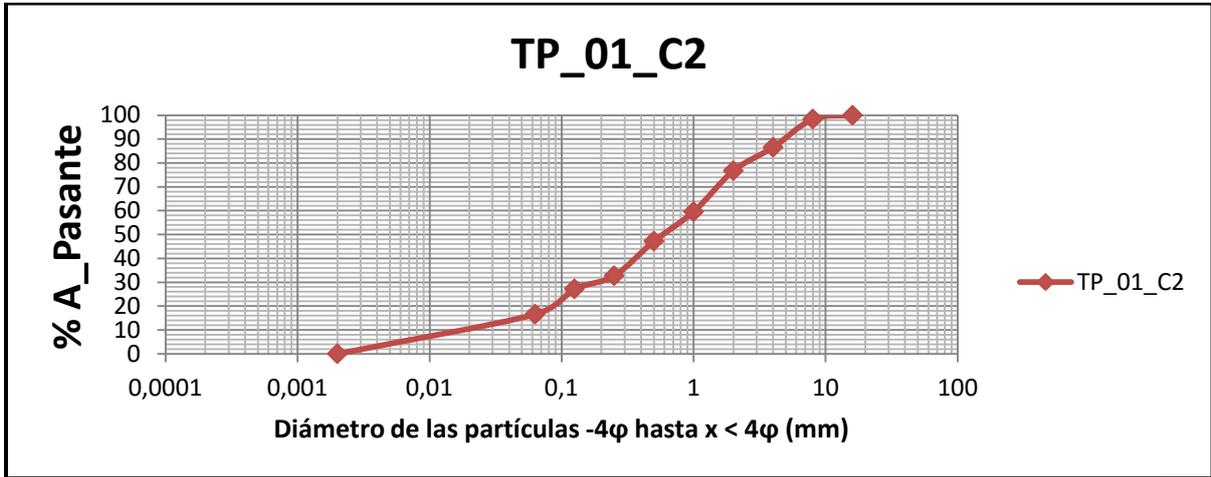




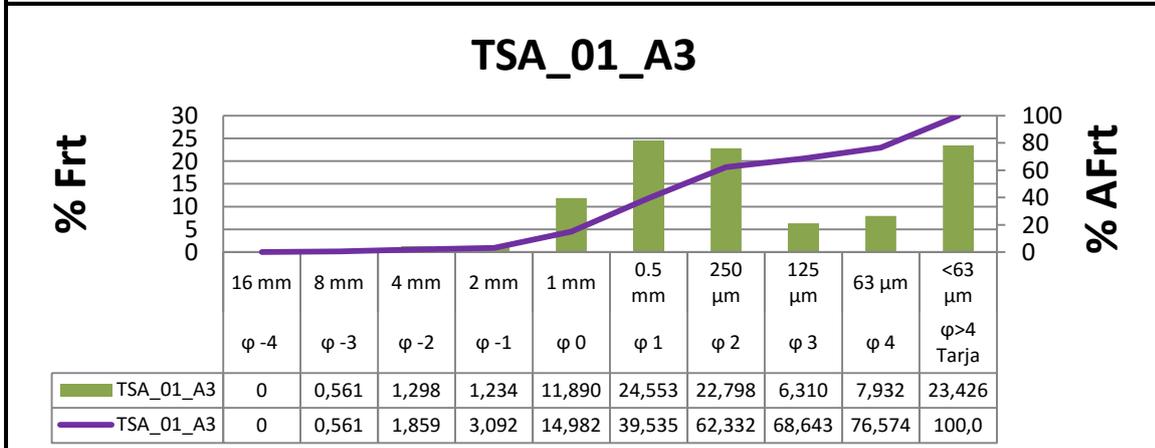
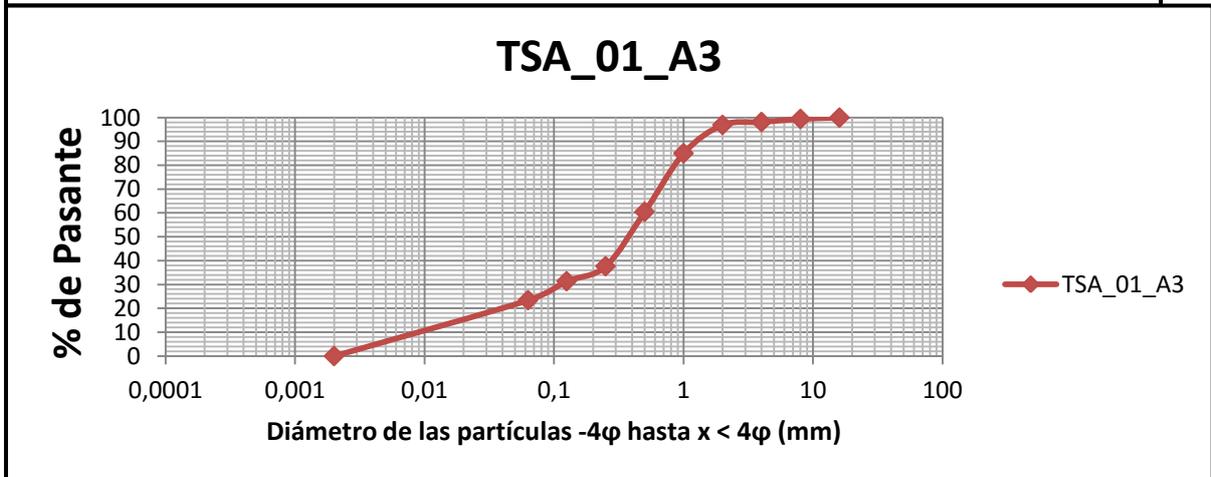
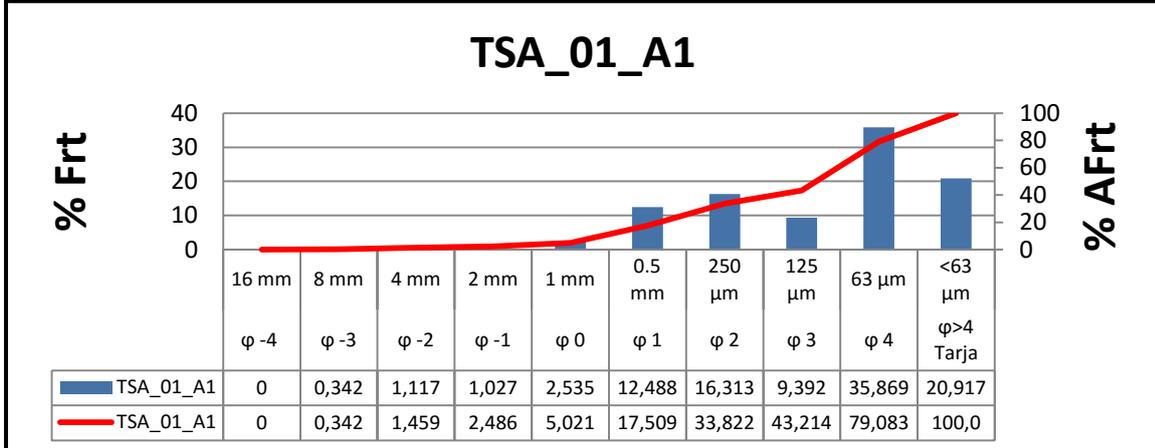
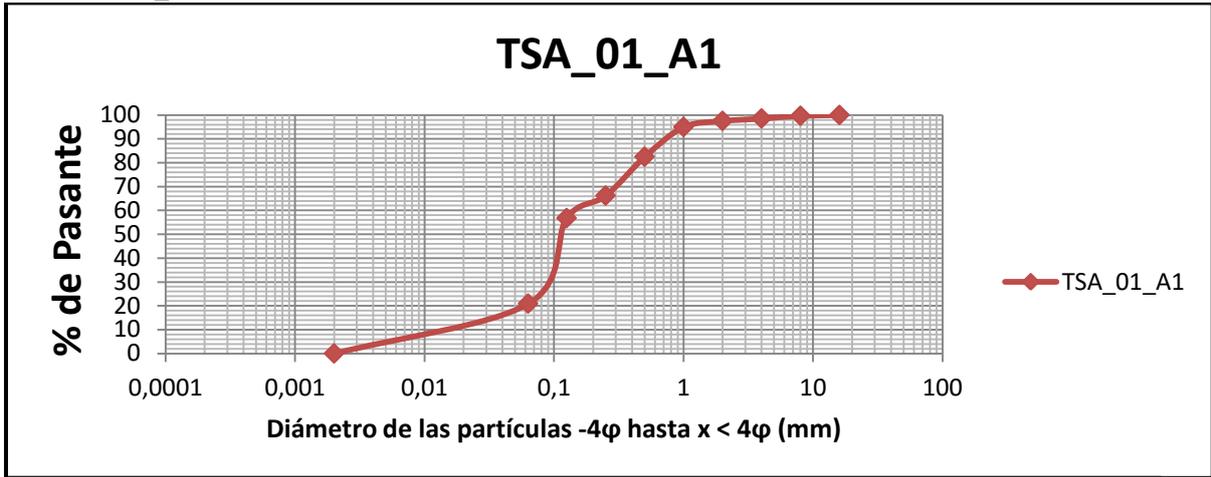
- TP_01

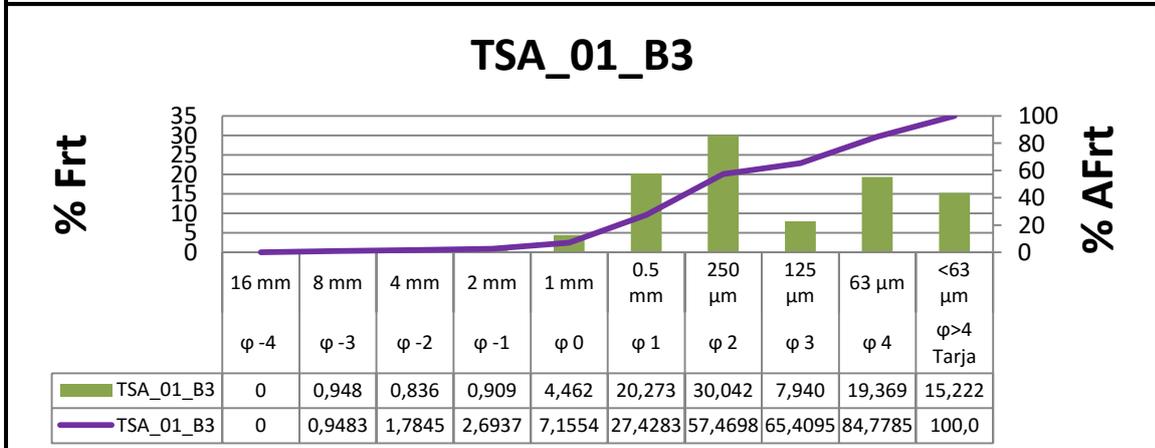
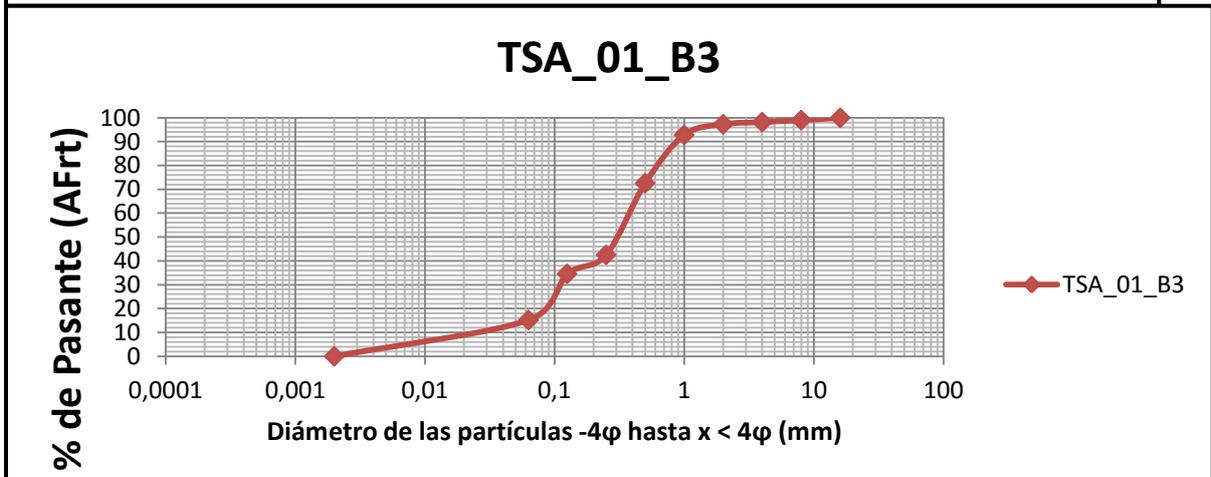
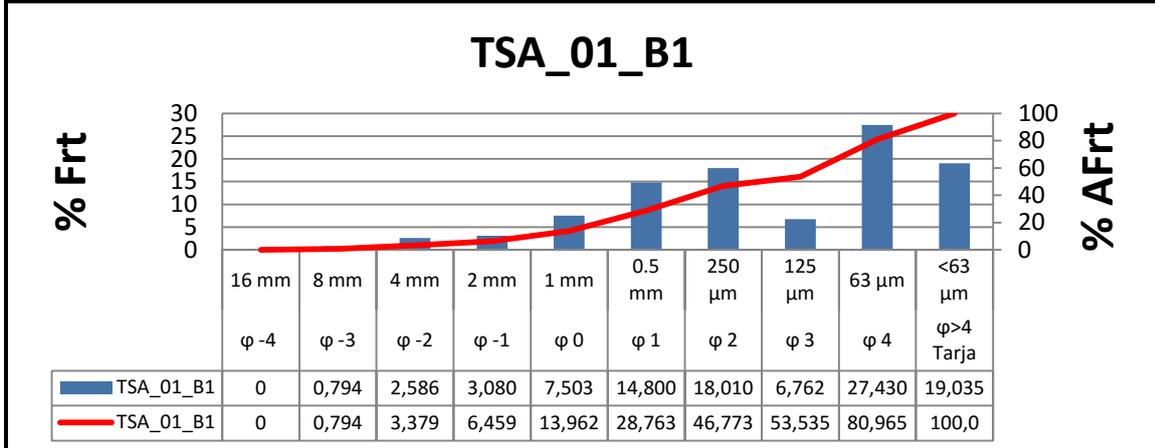
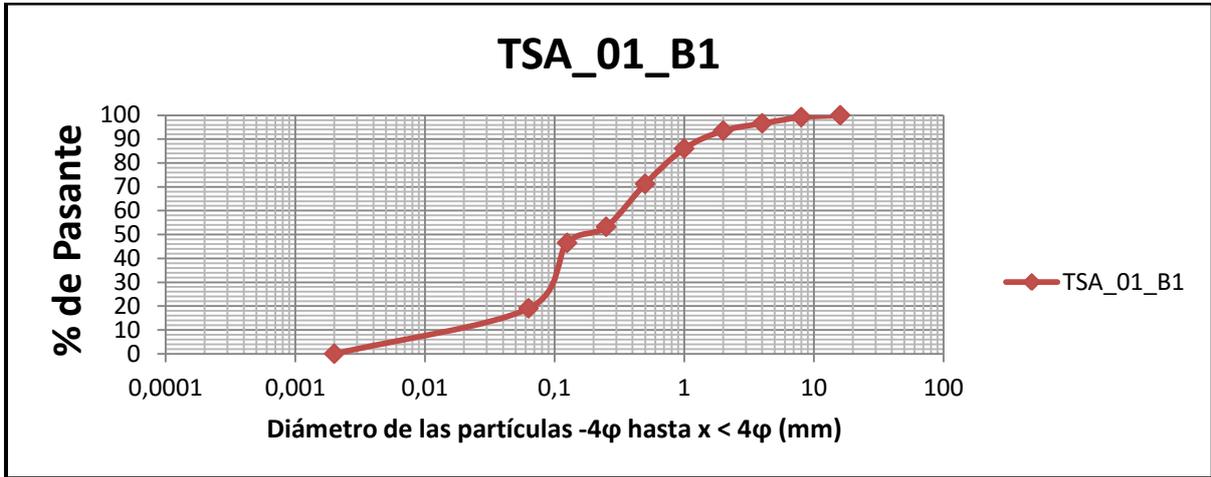


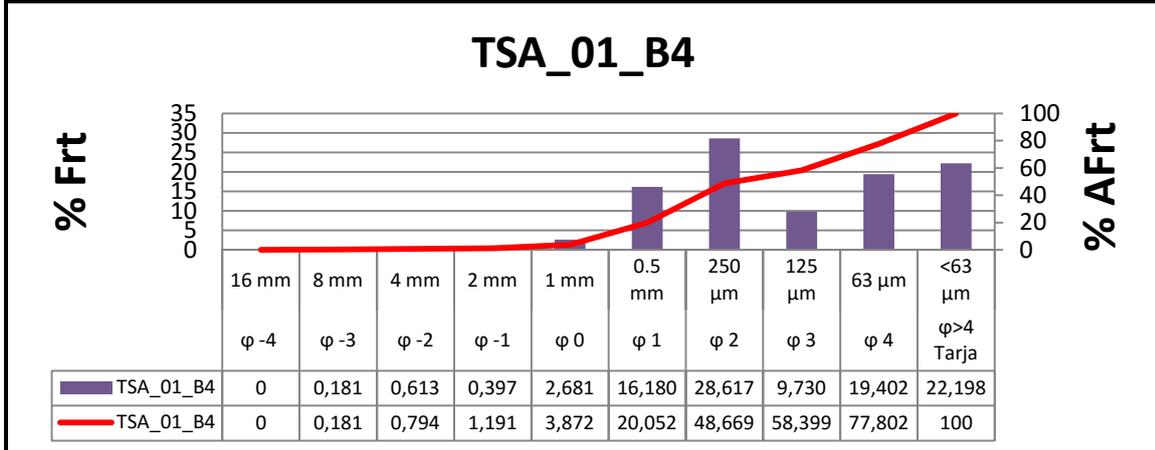
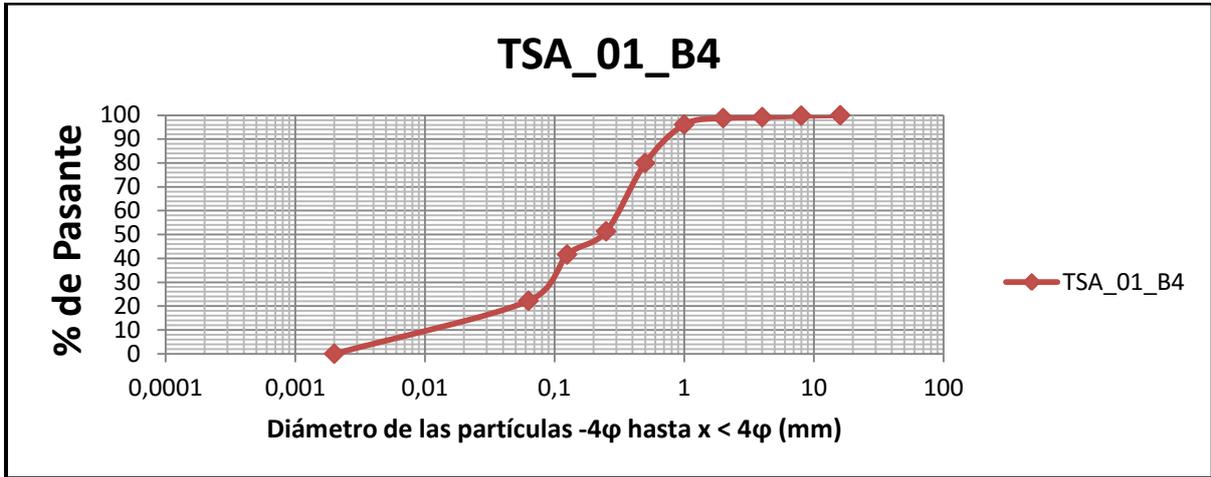




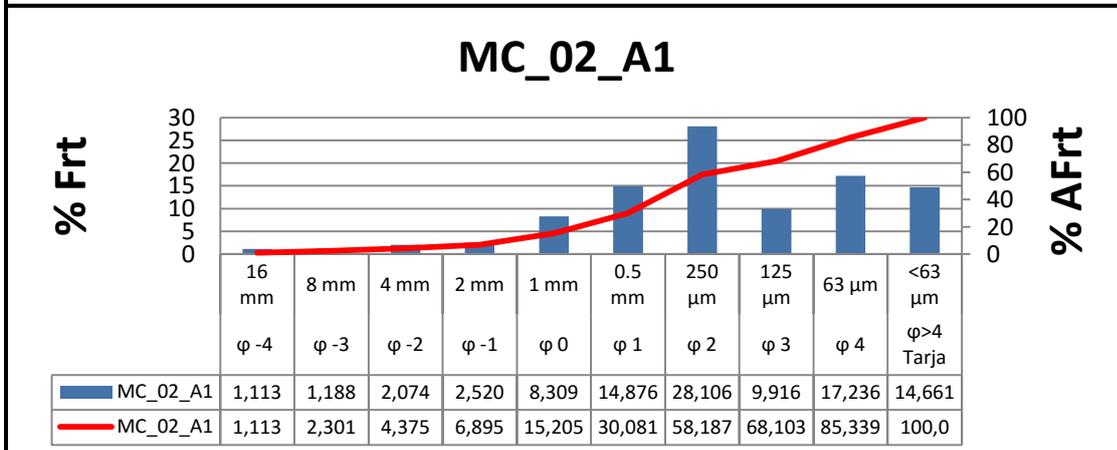
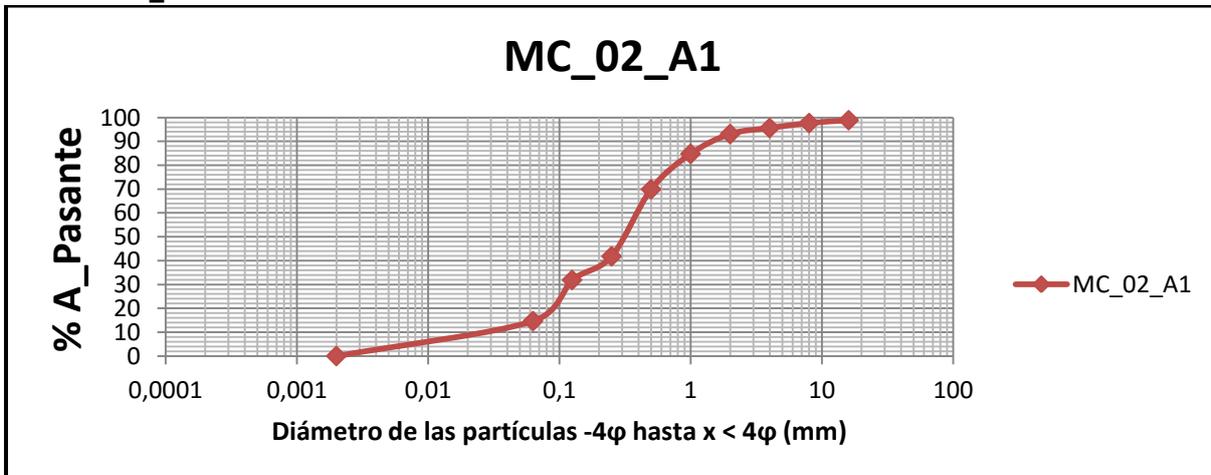
▪ TSA_01

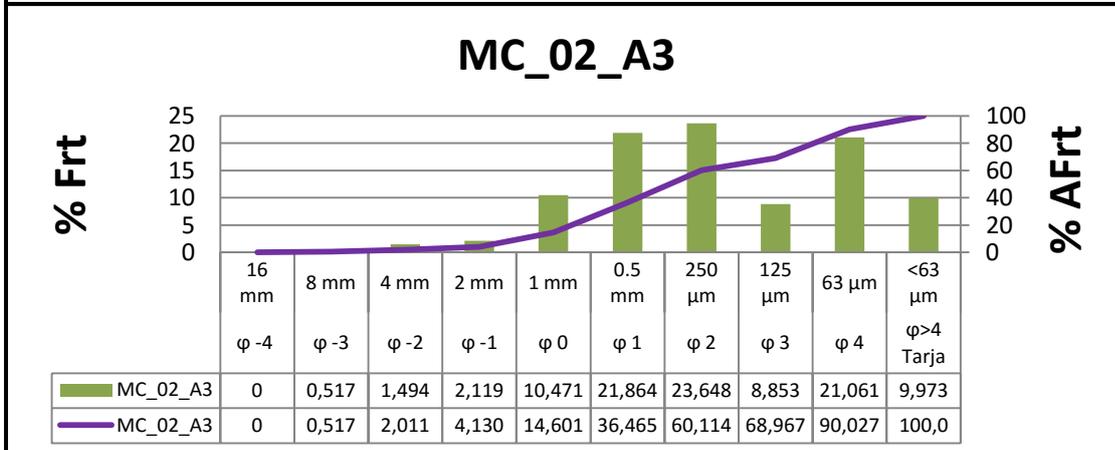
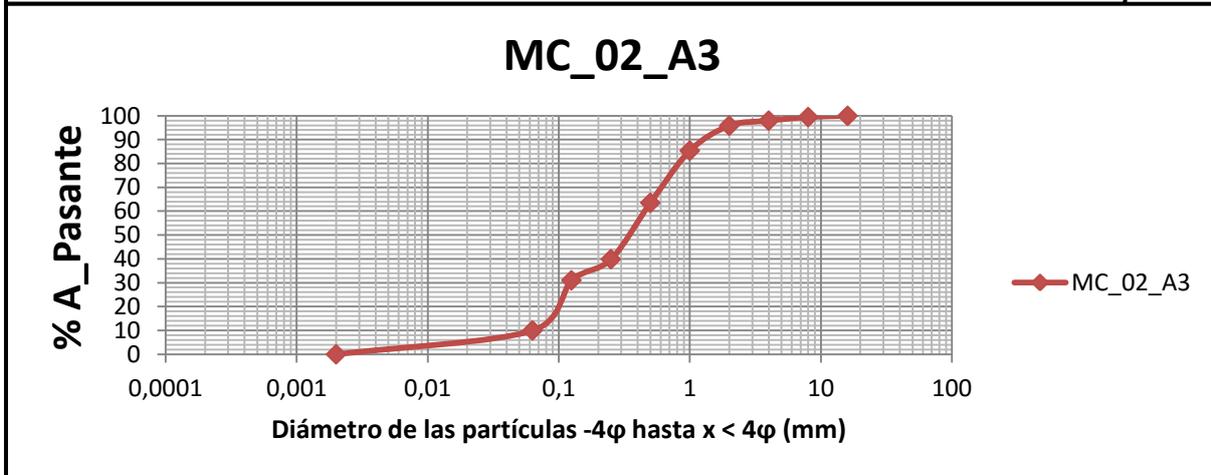
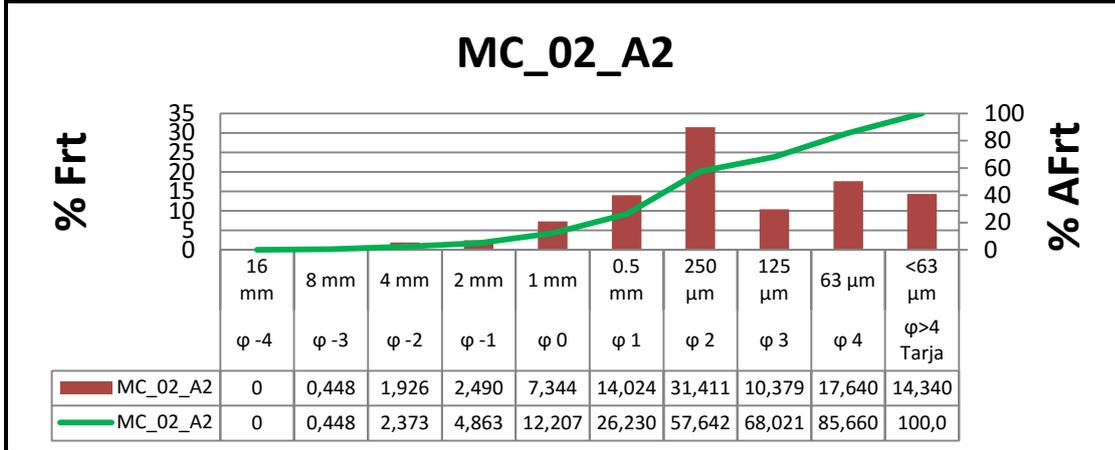
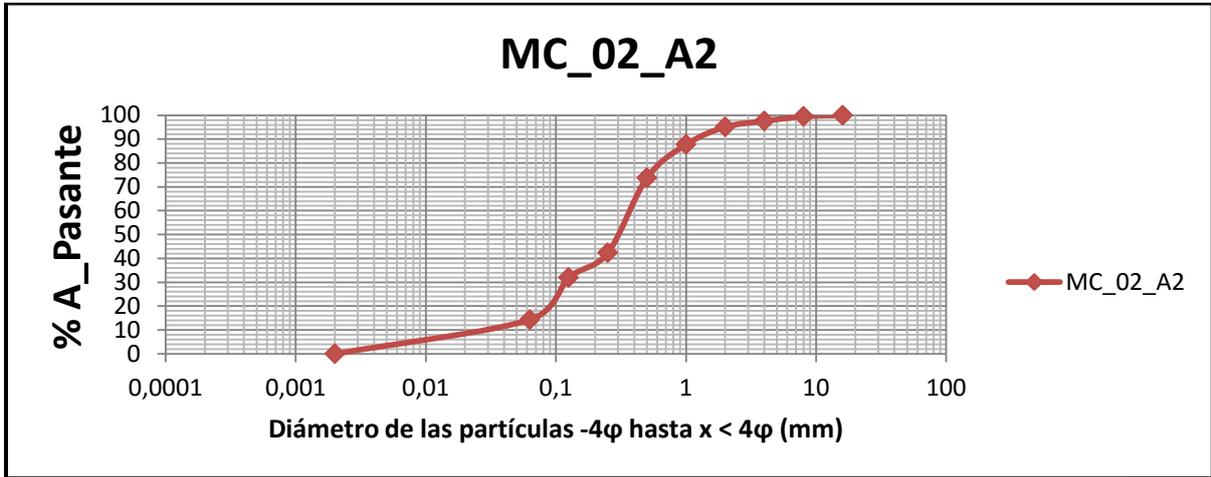


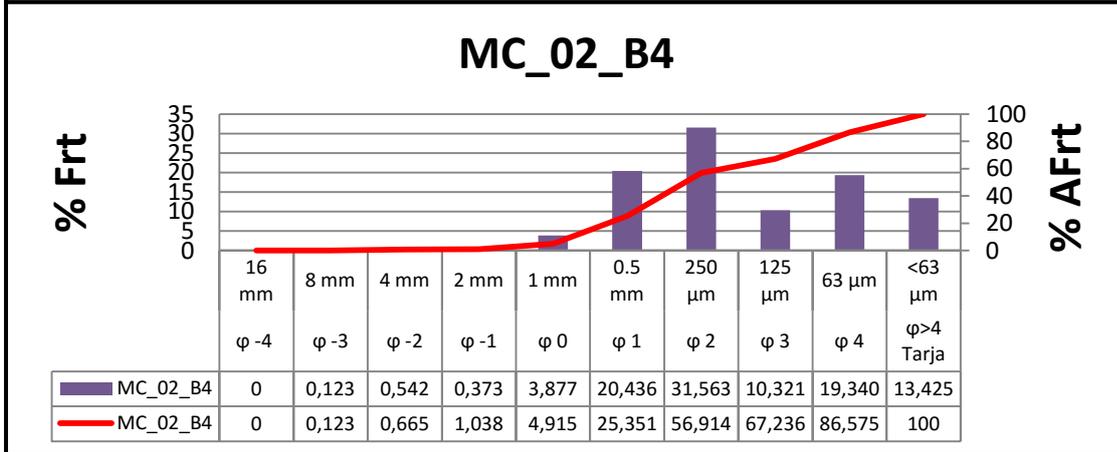
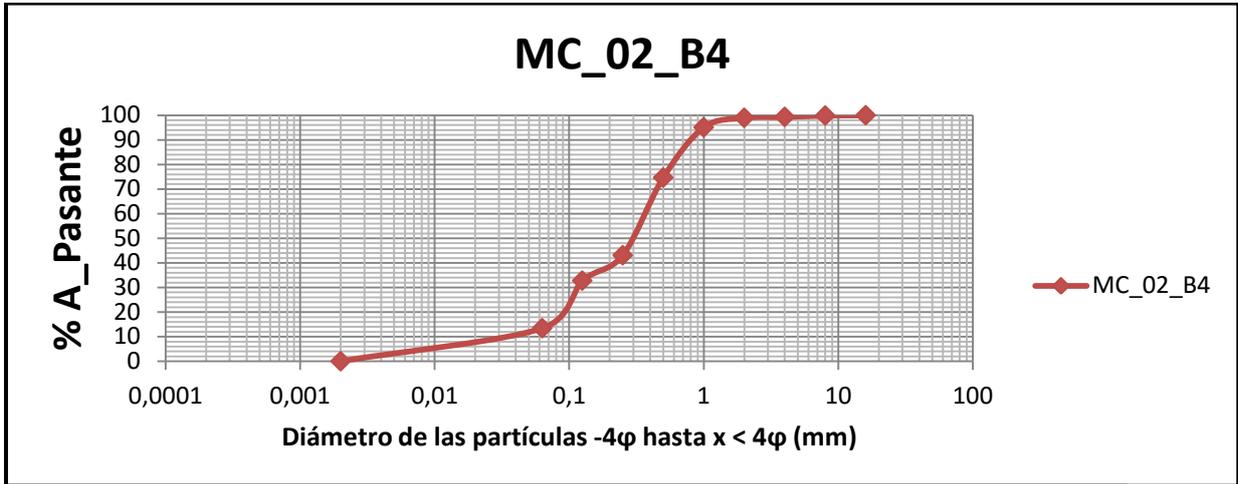




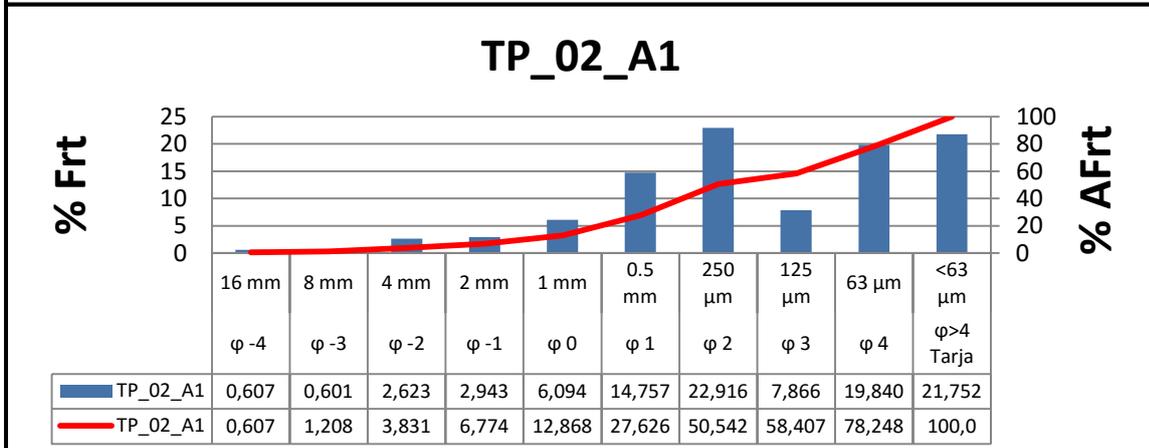
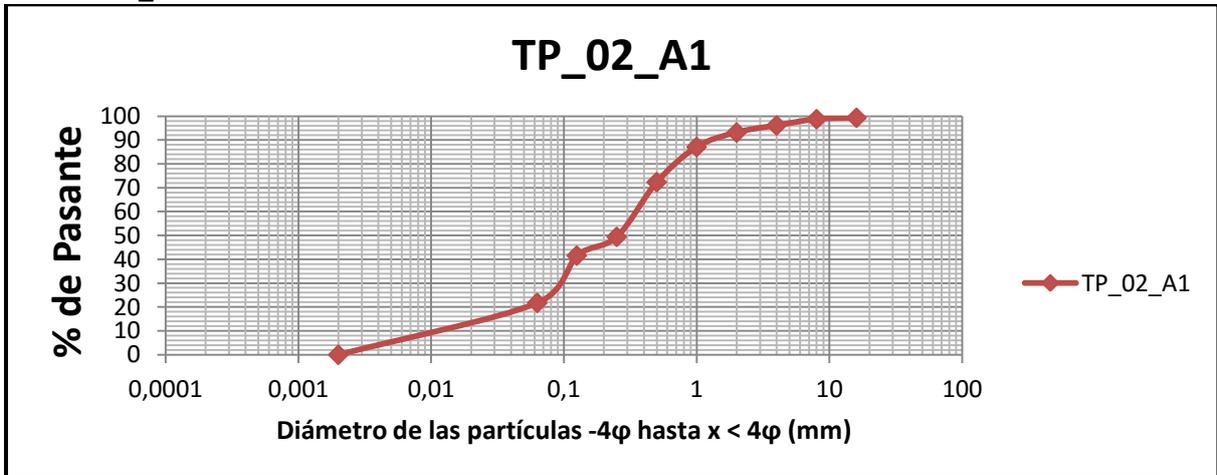
▪ **MC_02**

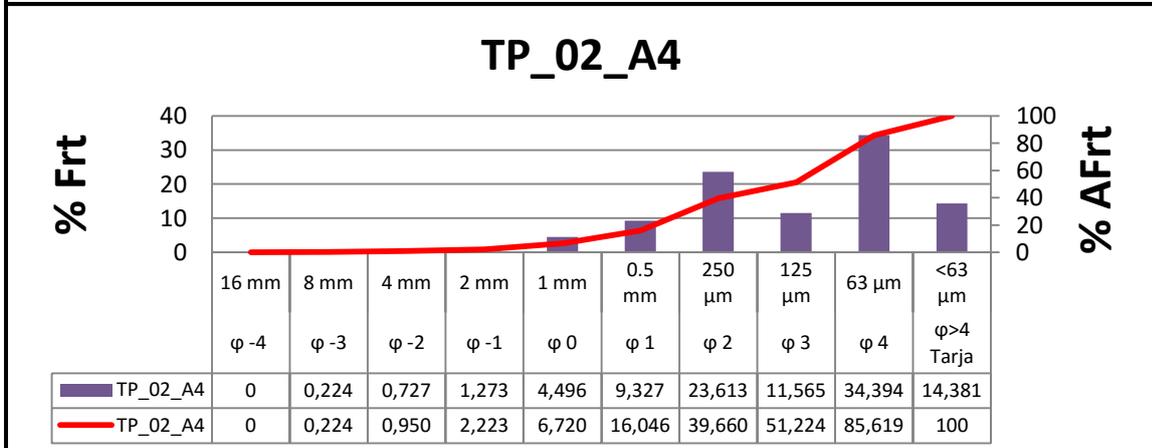
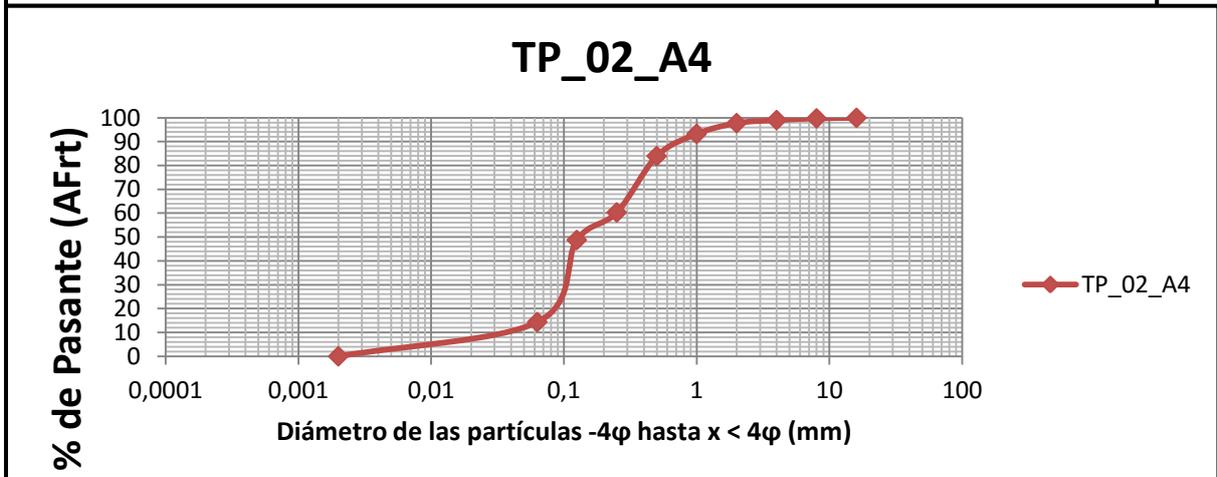
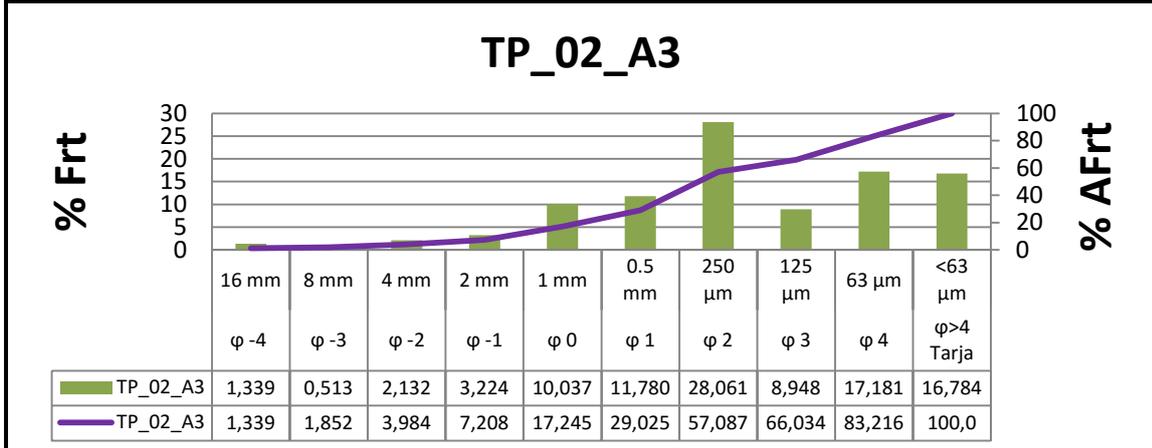
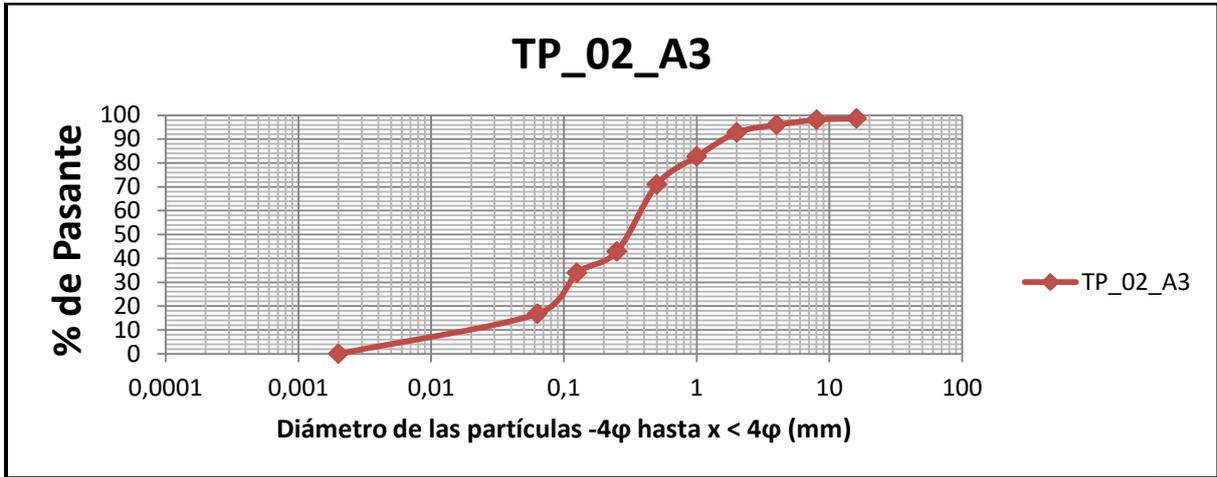




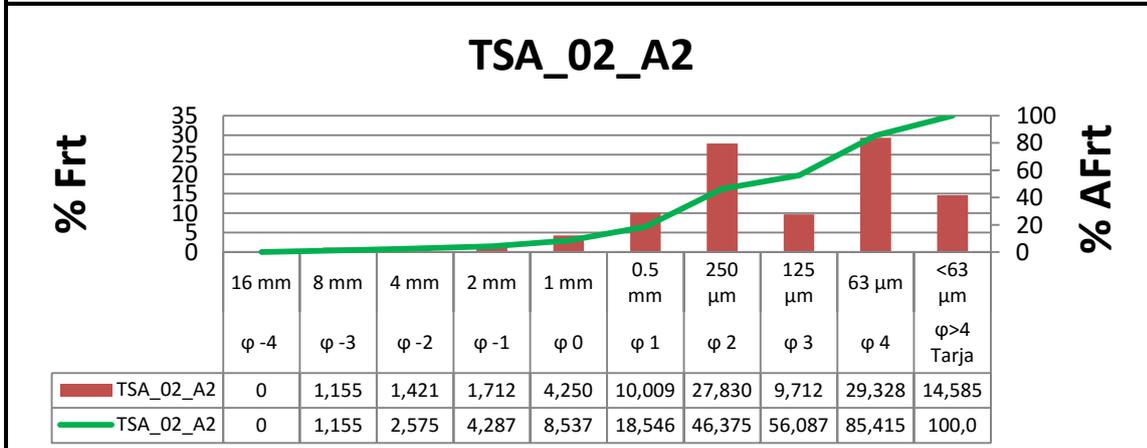
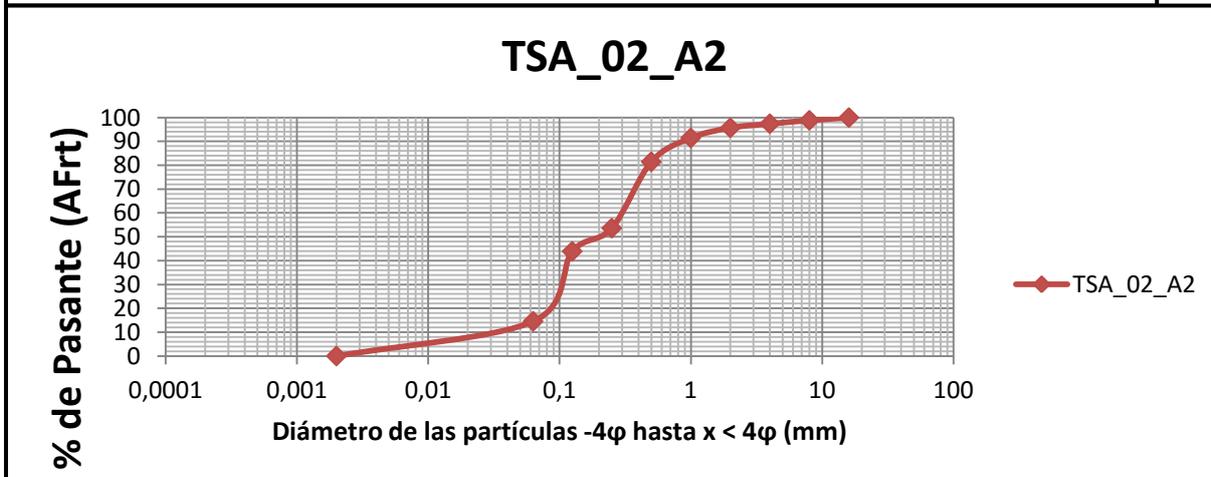
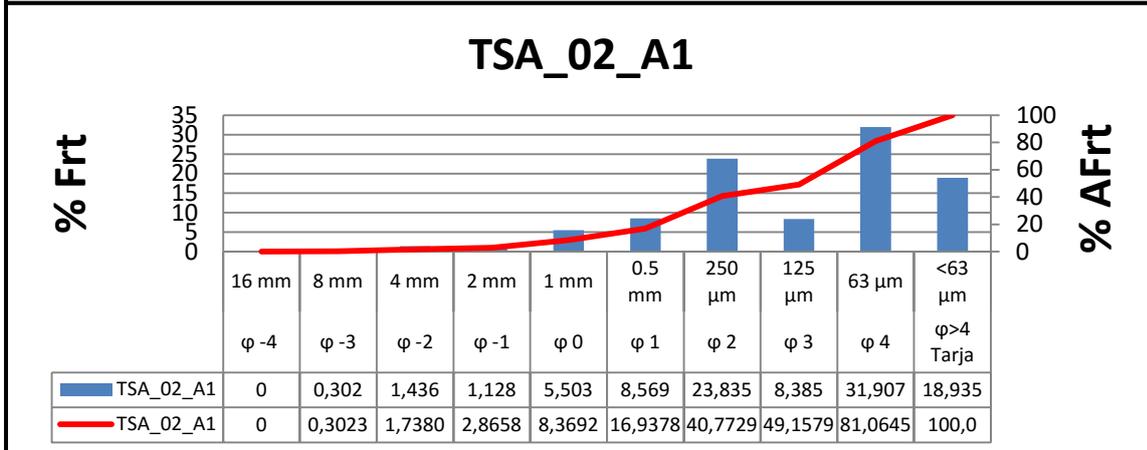
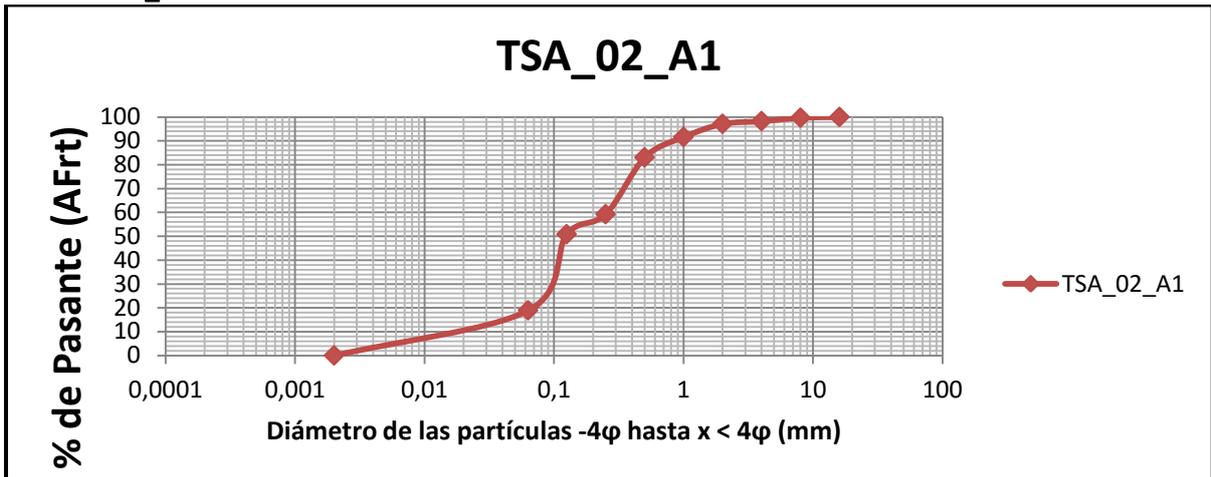


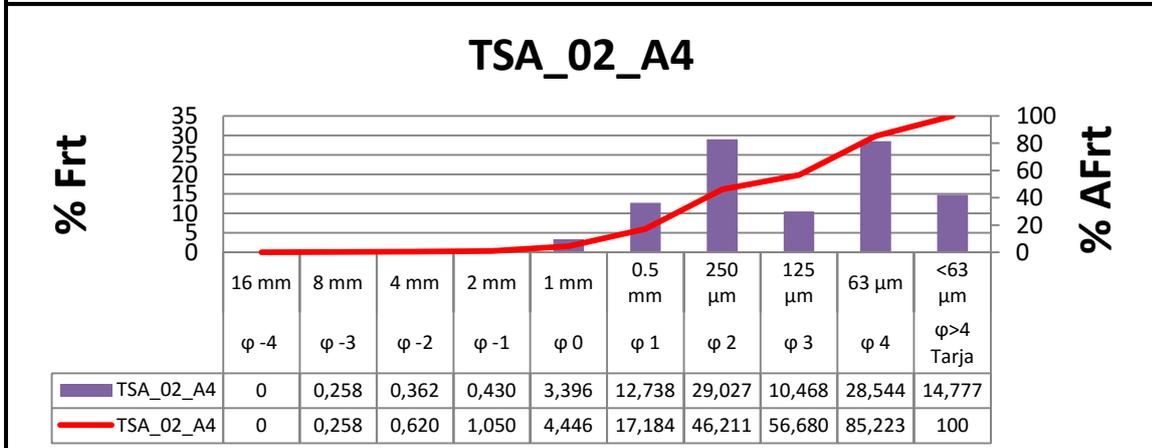
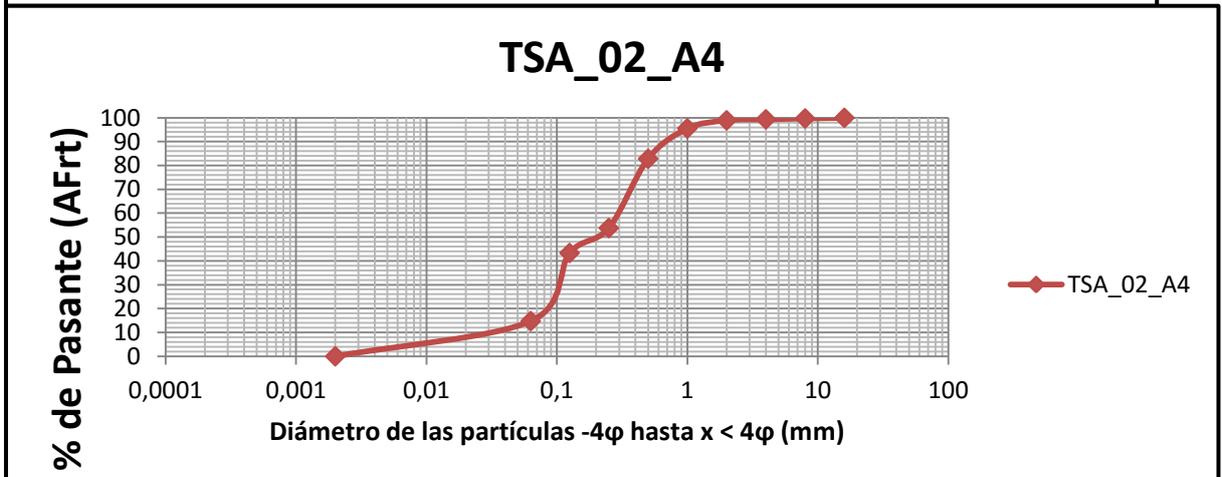
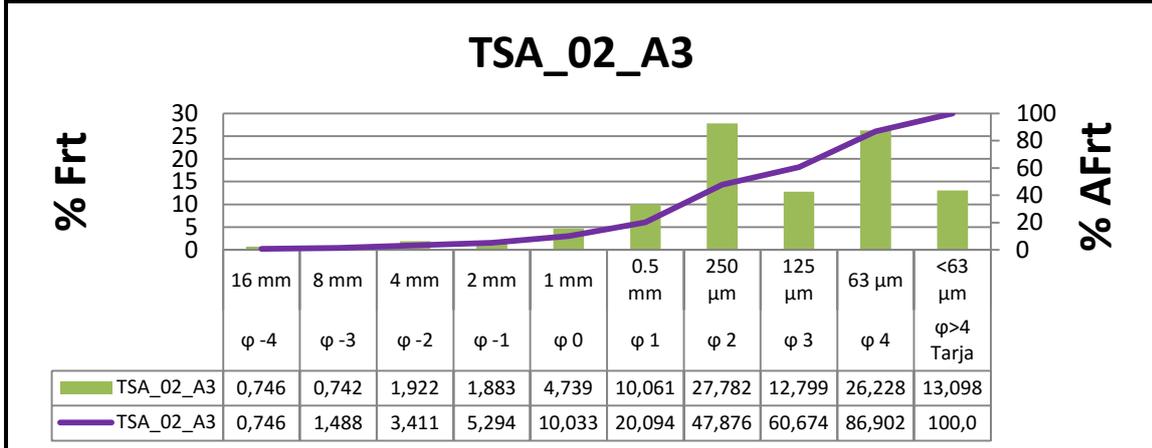
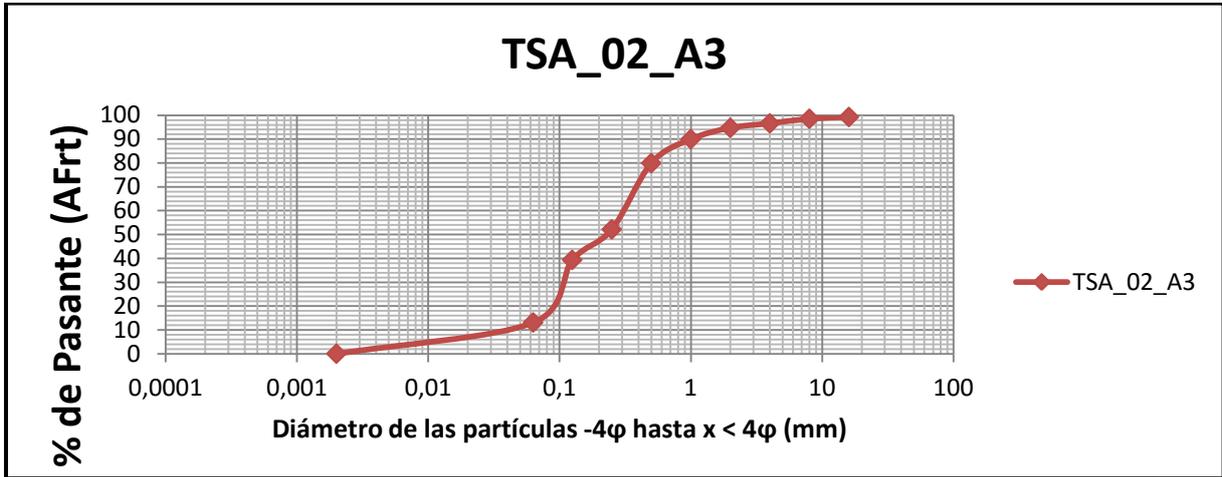
▪ TP_02





▪ TSA_02





II.1.2. Granulometría Fracción Fina. Cálculos

A continuación se muestran las hojas de cálculo de la fracción fina:

▪ **MC_01**

MUESTRA		Hora Inicial		Cm	Cd	Ct /°C ±20		Wmf (g)		Gs				
MC_01_A1		12:16:00		0,5	3,5	0,36		50		2,65				
Crono exp	Ti	Hora	R _L	R _i	R _c	C	C ₂₀	θ	T ^º	h	V	Diámetro	a	% P.
0:00:20	0,33	12:16:20	5	39	36	31	32,08	0,0132	23	9,180	0,4590	0,0778	1	64,16
0:00:30	0,5	13:16:30	5	37	34	29	30,08	0,0132	23	9,500	0,3167	0,0647	1	60,16
0:00:40	0,67	14:16:40	5	35	32	27	28,08	0,0132	23	9,820	0,2455	0,0569	1	56,16
00:01:00	1,00	12:17:00	5	34	31	26	27,08	0,0132	23	9,980	0,1663	0,0469	1	54,16
0:01:30	1,5	12:17:30	5	32	29	24	25,08	0,0132	23	10,300	0,1144	0,0389	1	50,16
00:02:00	2	12:18:00	5	31	28	23	24,08	0,0132	23	10,460	0,0872	0,0339	1	48,16
00:03:00	3	12:19:00	5	31	28	23	24,08	0,0132	23	10,460	0,0581	0,0277	1	48,16
00:10:00	10	12:26:00	5	25,3	22,3	17,3	18,38	0,0132	23	11,372	0,0190	0,0158	1	36,76
00:30:00	30	12:46:00	5	21,2	18,2	13,2	14,28	0,0132	23	12,028	0,0067	0,0094	1	28,56
00:60:00	60	13:16:00	5	18	15	10	11,08	0,0132	23	12,540	0,0035	0,0068	1	22,16
01:30:00	90	13:46:00	4,5	17	14	9,5	10,76	0,0131	23,5	12,700	0,0024	0,0056	1	21,52
02:00:00	120	14:16:00	4,5	16	13	8,5	9,76	0,0131	23,5	12,860	0,0018	0,0048	1	19,52
07:00:00	420	19:16:00	4	12	9	5	6,44	0,013	24	13,500	0,0005	0,0026	1	12,88
08:00:00	480	20:16:00	4	11,7	8,7	4,7	6,14	0,013	24	13,548	0,0005	0,0025	1	12,28
24:00:00	1440	12:17:00	4	9	6	2	3,44	0,013	24	13,980	0,0002	0,0015	1	6,88
MUESTRA		Hora Inicial		Cm	Cd	Ct /°C ±20		Wmf (g)		Gs				
MC_01_A2		10:22:30		0,5	3,5	0,36		50		2,65				
Crono exp	Ti	Hora	R _L	R _i	R _c	C	C ₂₀	θ	T ^º	h	V	Diámetro	a	% P.
0:00:20	0,33	10:22:50	5	37	34	29	30,08	0,0132	23	9,5	0,4750	0,0792	1	60,16
0:00:30	0,5	10:23:00	5	36	33	28	29,08	0,0132	23	9,66	0,3220	0,0652	1	58,16
0:00:40	0,67	10:23:10	5	35	32	27	28,08	0,0132	23	9,82	0,2455	0,0569	1	56,16
00:01:00	1,00	10:23:30	5	34,2	31,2	26,2	27,28	0,0132	23	9,948	0,1658	0,0468	1	54,56
0:01:30	1,5	10:24:00	5	32,8	29,8	24,8	25,88	0,0132	23	10,172	0,1130	0,0386	1	51,76
00:02:00	2	10:24:00	5	32	29	24	25,08	0,0132	23	10,3	0,0858	0,0337	1	50,16
00:03:00	3	10:25:30	5	30,5	27,5	22,5	23,58	0,0132	23	10,54	0,0586	0,0278	1	47,16
00:10:00	10	10:32:30	5	26,3	23,3	18,3	19,38	0,0132	23	11,212	0,0187	0,0157	1	38,76
00:30:00	30	10:52:30	5	22,4	19,4	14,4	15,48	0,0132	23	11,836	0,0066	0,0093	1	30,96
00:60:00	60	11:22:30	5	19	16	11	12,08	0,0132	23	12,38	0,0034	0,0067	1	24,16
01:30:00	90	11:52:30	5	17,5	14,5	9,5	10,58	0,0132	23	12,62	0,0023	0,0056	1	21,16
02:00:00	120	12:22:30	5	16,5	13,5	8,5	9,58	0,0132	23	12,78	0,0018	0,0048	1	19,16
07:00:00	420	17:22:30	4,5	12,1	9,1	4,6	5,86	0,0131	23,5	13,484	0,0005	0,0026	1	11,72
08:00:00	480	18:22:30	4,5	11,9	8,9	4,4	5,66	0,0131	23,5	13,516	0,0005	0,0025	1	11,32
24:00:00	1440	10:22:30	5	10	7	2	3,08	0,0132	23	13,82	0,0002	0,0015	1	6,16
MUESTRA		Hora Inicial		Cm	Cd	Ct /°C ±20		Wmf (g)		Gs Dens. Sólidos				
MC_01_A3		10:59:30		0,5	3,5	0,36		50		2,65				
Crono exp	Ti	Hora	R _L	R _i	R _c	C	C ₂₀	θ	T ^º	h	V	Diámetro	a	% P.
0:00:20	0,33	10:59:50	5	41	38	33	34,08	0,0132	23	8,86	0,4430	0,0765	1	68,16
0:00:30	0,5	11:00:00	5	40	37	32	33,08	0,0132	23	9,02	0,3007	0,0630	1	66,16
0:00:40	0,67	11:00:10	5	38,5	35,5	30,5	31,58	0,0132	23	9,26	0,2315	0,0553	1	63,16
00:01:00	1,00	11:00:30	5	36,8	33,8	28,8	29,88	0,0132	23	9,532	0,1589	0,0458	1	59,76
0:01:30	1,5	11:01:00	5	35,5	32,5	27,5	28,58	0,0132	23	9,74	0,1082	0,0378	1	57,16
00:02:00	2	11:01:30	5	34,2	31,2	26,2	27,28	0,0132	23	9,948	0,0829	0,0331	1	54,56
00:03:00	3	11:02:30	5	33	30	25	26,08	0,0132	23	10,14	0,0563	0,0273	1	52,16
00:10:00	10	11:09:30	5	29,8	26,8	21,8	22,88	0,0132	23	10,652	0,0178	0,0153	1	45,76
00:30:00	30	11:29:30	5	25,7	22,7	17,7	18,78	0,0132	23	11,308	0,0063	0,0091	1	37,56
00:60:00	60	11:59:30	5	21,3	18,3	13,3	14,38	0,0132	23	12,012	0,0033	0,0066	1	28,76
01:30:00	90	12:29:30	5	21,1	18,1	13,1	14,18	0,0132	23	12,044	0,0022	0,0054	1	28,36
02:00:00	120	12:59:30	5	20	17	12	13,08	0,0132	23	12,22	0,0017	0,0047	1	26,16
07:00:00	420	17:59:30	4,5	16,1	13,1	8,6	9,86	0,0131	23,5	12,844	0,0005	0,0026	1	19,72
08:00:00	480	18:59:30	4,5	15,6	12,6	8,1	9,36	0,0131	23,5	12,924	0,0004	0,0024	1	18,72
24:00:00	1440	10:59:30	5	13,1	10,1	5,1	6,18	0,0132	23	13,324	0,0002	0,0014	1	12,36

MUESTRA		Hora Inicial		Cm	Cd	Ct /°C ±20		Wmf g)		Gs Dens. Sólidos				
MC_01_B4		12:02:00		0,5	3,5	0,36		50		2,65				
Crono exp	Ti	Hora	R _L	R _i	R _c	C	C ₂₀	θ	T ^º	h	V	Diámetro	a	% P.
0:00:20	0,33	12:02:20	5	45	42	37	38,08	0,0132	23	8,22	0,4110	0,0737	1	76,16
0:00:30	0,5	12:02:30	5	44	41	36	37,08	0,0132	23	8,38	0,2793	0,0607	1	74,16
0:00:40	0,67	12:02:40	5	43	40	35	36,08	0,0132	23	8,54	0,2135	0,0531	1	72,16
00:01:00	1,00	12:03:00	5	41	38	33	34,08	0,0132	23	8,86	0,1477	0,0441	1	68,16
0:01:30	1,5	12:03:30	5	40,2	37,2	32,2	33,28	0,0132	23	8,988	0,0999	0,0363	1	66,56
00:02:00	2	12:04:00	5	39,8	36,8	31,8	32,88	0,0132	23	9,052	0,0754	0,0316	1	65,76
00:03:00	3	12:05:00	5	38,8	35,8	30,8	31,88	0,0132	23	9,212	0,0512	0,0260	1	63,76
00:10:00	10	12:12:00	5	35,9	32,9	27,9	28,98	0,0132	23	9,676	0,0161	0,0146	1	57,96
00:30:00	30	12:32:00	5	33,5	30,5	25,5	26,58	0,0132	23	10,06	0,0056	0,0086	1	53,16
00:60:00	60	13:02:00	5	32,3	29,3	24,3	25,38	0,0132	23	10,252	0,0028	0,0061	1	50,76
01:30:00	90	13:32:00	5	31,2	28,2	23,2	24,28	0,0132	23	10,428	0,0019	0,0050	1	48,56
02:00:00	120	14:02:00	5	31	28	23	24,08	0,0132	23	10,46	0,0015	0,0044	1	48,16
07:00:00	420	19:02:00	4,5	28,8	25,8	21,3	22,56	0,0131	23,5	10,812	0,0004	0,0024	1	45,12
08:00:00	480	20:02:00	4,5	28	25	20,5	21,76	0,0131	23,5	10,94	0,0004	0,0022	1	43,52
24:00:00	1440	12:02:00	5	26,8	23,8	18,8	19,88	0,0132	23	11,132	0,0001	0,0013	1	39,76

MUESTRA		Hora Inicial		Cm	Cd	Ct /°C ±20		Wmf g)		Gs Dens. Sólidos				
MC_01_C+1		9:50:01		0,5	3,5	0,36		50		2,65				
Crono exp	Ti	Hora	R _L	R _i	R _c	C	C ₂₀	θ	T ^º	h	V	Diámetro	a	% P.
0:00:20	0,33	9:50:21	5	24,5	21,5	16,5	17,58	0,0132	23	11,5	0,5750	0,0871	1	35,16
0:00:30	0,5	9:50:31	5	22,8	19,8	14,8	15,88	0,0132	23	11,772	0,3924	0,0720	1	31,76
0:00:40	0,67	9:50:41	5	22	19	14	15,08	0,0132	23	11,9	0,2975	0,0627	1	30,16
00:01:00	1,00	9:51:01	5	20,5	17,5	12,5	13,58	0,0132	23	12,14	0,2023	0,0517	1	27,16
0:01:30	1,5	9:51:31	5	19	16	11	12,08	0,0132	23	12,38	0,1376	0,0426	1	24,16
00:02:00	2	9:52:01	5	18,5	15,5	10,5	11,58	0,0132	23	12,46	0,1038	0,0370	1	23,16
00:03:00	3	9:53:01	5	17,7	14,7	9,7	10,78	0,0132	23	12,588	0,0699	0,0304	1	21,56
00:10:00	10	10:00:01	5	15,1	12,1	7,1	8,18	0,0132	23	13,004	0,0217	0,0169	1	16,36
00:30:00	30	10:20:01	5	13,5	10,5	5,5	6,58	0,0132	23	13,26	0,0074	0,0099	1	13,16
00:60:00	60	10:50:01	5	13,2	10,2	5,2	6,28	0,0132	23	13,308	0,0037	0,0070	1	12,56
01:30:00	90	11:20:01	5	13	10	5	6,08	0,0132	23	13,34	0,0025	0,0057	1	12,16
02:00:00	120	11:50:01	5	12,5	9,5	4,5	5,58	0,0132	23	13,42	0,0019	0,0050	1	11,16
07:00:00	420	16:50:01	5	11,2	8,2	3,2	4,28	0,0132	23	13,628	0,0005	0,0027	1	8,56
08:00:00	480	17:50:01	5	11	8	3	4,08	0,0132	23	13,66	0,0005	0,0025	1	8,16
24:00:00	1440	9:50:01	4	10,1	7,1	3,1	4,54	0,013	24	13,804	0,0002	0,0014	1	9,08

▪ TP_01

MUESTRA		Hora Inicial		Cm	Cd	Ct /°C ±20		Wmf g)		Gs Dens. Sólidos				
TP_01_A1		10:25:01		0,5	3,5	0,36		50		2,65				
Crono exp	Ti	Hora	R _L	R _i	R _c	C	C ₂₀	θ	T ^º	h	V	Diámetro	a	% P.
0:00:20	0,33	10:25:21	5	39	36	31	32,08	0,0132	23	9,18	0,4590	0,0778	1	64,16
0:00:30	0,5	10:25:31	5	37	34	29	30,08	0,0132	23	9,5	0,3167	0,0647	1	60,16
0:00:40	0,67	10:25:41	5	35	32	27	28,08	0,0132	23	9,82	0,2455	0,0569	1	56,16
00:01:00	1,00	10:26:01	5	33,5	30,5	25,5	26,58	0,0132	23	10,06	0,1677	0,0470	1	53,16
0:01:30	1,5	10:26:31	5	31,2	28,2	23,2	24,28	0,0132	23	10,428	0,1159	0,0391	1	48,56
00:02:00	2	10:27:01	5	29	26	21	22,08	0,0132	23	10,78	0,0898	0,0344	1	44,16
00:03:00	3	10:28:01	5	27,4	24,4	19,4	20,48	0,0132	23	11,036	0,0613	0,0284	1	40,96
00:10:00	10	10:35:01	5	22,5	19,5	14,5	15,58	0,0132	23	11,82	0,0197	0,0161	1	31,16
00:30:00	30	10:55:01	5	18,1	15,1	10,1	11,18	0,0132	23	12,524	0,0070	0,0096	1	22,36
00:60:00	60	11:25:01	5	17,2	14,2	9,2	10,28	0,0132	23	12,668	0,0035	0,0068	1	20,56
01:30:00	90	11:55:01	5	15,3	12,3	7,3	8,38	0,0132	23	12,972	0,0024	0,0056	1	16,76
02:00:00	120	12:25:01	5	14,5	11,5	6,5	7,58	0,0132	23	13,1	0,0018	0,0049	1	15,16
07:00:00	420	17:25:01	5	12,7	9,7	4,7	5,78	0,0132	23	13,388	0,0005	0,0026	1	11,56
08:00:00	480	18:25:01	5	12,4	9,4	4,4	5,48	0,0132	23	13,436	0,0005	0,0025	1	10,96
24:00:00	1440	10:25:01	4	10,8	7,8	3,8	5,24	0,013	24	13,692	0,0002	0,0014	1	10,48

MUESTRA		Hora Inicial		Cm	Cd	Ct /°C ±20		Wmf (g)		Gs Dens. Sólidos				
TP_01_A2		10:57:00		0,5	3,5	0,36		50		2,65				
Crono exp	Ti	Hora	R _L	Ri	Rc	C	C ₂₀	θ	T ^º	h	V	Diámetro	a	% P.
0:00:20	0,33	10:57:20	5	38	35	30	31,08	0,0132	23	9,34	0,4670	0,0785	1	62,16
0:00:30	0,5	10:27:30	5	36	33	28	29,08	0,0132	23	9,66	0,3220	0,0652	1	58,16
0:00:40	0,67	10:27:40	5	34,8	31,8	26,8	27,88	0,0132	23	9,85	0,2463	0,0570	1	55,76
00:01:00	1,00	10:58:00	5	32	29	24	25,08	0,0132	23	10,30	0,1717	0,0476	1	50,16
0:01:30	1,5	10:58:30	5	31	28	23	24,08	0,0132	23	10,46	0,1162	0,0392	1	48,16
00:02:00	2	10:59:00	5	30	27	22	23,08	0,0132	23	10,62	0,0885	0,0342	1	46,16
00:03:00	3	11:00:00	5	26,2	23,2	18,2	19,28	0,0132	23	11,23	0,0624	0,0287	1	38,56
00:10:00	10	11:07:00	5	21,5	18,5	13,5	14,58	0,0132	23	11,98	0,0200	0,0162	1	29,16
00:30:00	30	11:27:00	5	18,7	15,7	10,7	11,78	0,0132	23	12,43	0,0069	0,0095	1	23,56
00:60:00	60	11:57:00	5	16,2	13,2	8,2	9,28	0,0132	23	12,83	0,0036	0,0069	1	18,56
01:30:00	90	12:27:00	5	15,3	12,3	7,3	8,38	0,0132	23	12,97	0,0024	0,0056	1	16,76
02:00:00	120	12:57:00	5	14,2	11,2	6,2	7,28	0,0132	23	13,15	0,0018	0,0049	1	14,56
07:00:00	420	17:57:00	5	12,1	9,1	4,1	5,18	0,0132	23	13,48	0,0005	0,0027	1	10,36
08:00:00	480	18:57:00	4	11,8	8,8	4,8	6,24	0,013	24	13,53	0,0005	0,0025	1	12,48
24:00:00	1440	10:57:00	4	10,6	7,6	3,6	5,04	0,013	24	13,72	0,0002	0,0014	1	10,08
MUESTRA		Hora Inicial		Cm	Cd	Ct /°C ±20		Wmf (g)		Gs Dens. Sólidos				
TP_01_B6		11:42:00		0,5	3,5	0,36		50		2,65				
Crono exp	Ti	Hora	R _L	Ri	Rc	C	C ₂₀	θ	T ^º	h	V	Diámetro	a	% P.
0:00:20	0,33	11:42:20	5	34,5	31,5	26,5	27,58	0,0132	23	9,90	0,4950	0,0808	1	55,16
0:00:30	0,5	11:42:30	5	30	27	22	23,08	0,0132	23	10,62	0,3540	0,0684	1	46,16
0:00:40	0,67	11:42:40	5	27	24	19	20,08	0,0132	23	11,10	0,2775	0,0605	1	40,16
00:01:00	1,00	11:43:00	5	22,5	19,5	14,5	15,58	0,0132	23	11,82	0,1970	0,0510	1	31,16
0:01:30	1,5	11:43:30	5	19	16	11	12,08	0,0132	23	12,38	0,1376	0,0426	1	24,16
00:02:00	2	11:44:00	5	16,5	13,5	8,5	9,58	0,0132	23	12,78	0,1065	0,0375	1	19,16
00:03:00	3	11:45:00	5	14,5	11,5	6,5	7,58	0,0132	23	13,10	0,0728	0,0310	1	15,16
00:10:00	10	11:52:00	5	10,7	7,7	2,7	3,78	0,0132	23	13,71	0,0228	0,0174	1	7,56
00:30:00	30	12:12:00	5	8,5	5,5	0,5	1,58	0,0132	23	14,06	0,0078	0,0102	1	3,16
00:60:00	60	12:42:00	5	7,8	4,8	-0,2	0,88	0,0132	23	14,17	0,0039	0,0072	1	1,76
01:30:00	90	13:12:00	5	7,5	4,5	-0,5	0,58	0,0132	23	14,22	0,0026	0,0059	1	1,16
02:00:00	120	13:42:00	5	7,3	4,3	-0,7	0,38	0,0132	23	14,25	0,0020	0,0051	1	0,76
07:00:00	420	18:42:00	4	7,2	4,2	0,2	1,64	0,013	24	14,27	0,0006	0,0027	1	3,28
08:00:00	480	19:42:00	4	6,9	3,9	-0,1	1,34	0,013	24	14,32	0,0005	0,0025	1	2,68
24:00:00	1440	11:42:00	4	6,7	3,7	-0,3	1,14	0,013	24	14,35	0,0002	0,0015	1	2,28
MUESTRA		Hora Inicial		Cm	Cd	Ct /°C ±20		Wmf (g)		Gs Dens. Sólidos				
TP_01_C2		8:58:00		0,5	3,5	0,36		50		2,65				
Crono exp	Ti	Hora	R _L	Ri	Rc	C	C ₂₀	θ	T ^º	h	V	Diámetro	a	% P.
0:00:20	0,33	8:58:20	5	39	36	31	32,08	0,0132	23	9,18	0,4590	0,0778	1	64,16
0:00:30	0,5	8:58:30	5	37	34	29	30,08	0,0132	23	9,50	0,3167	0,0647	1	60,16
0:00:40	0,67	8:58:40	5	35,5	32,5	27,5	28,58	0,0132	23	9,74	0,2435	0,0567	1	57,16
0:01:00	1,00	8:59:00	5	33,5	30,5	25,5	26,58	0,0132	23	10,06	0,1677	0,0470	1	53,16
0:01:30	1,5	8:59:30	5	31,5	28,5	23,5	24,58	0,0132	23	10,38	0,1153	0,0390	1	49,16
0:02:00	2	9:00:00	5	30,2	27,2	22,2	23,28	0,0132	23	10,59	0,0882	0,0341	1	46,56
0:03:00	3	9:01:00	5	28,4	25,4	20,4	21,48	0,0132	23	10,88	0,0604	0,0282	1	42,96
0:10:00	10	9:08:00	5	24,1	21,1	16,1	17,18	0,0132	23	11,56	0,0193	0,0160	1	34,36
0:30:00	30	9:28:00	4	20,5	17,5	13,5	14,94	0,013	24	12,14	0,0067	0,0094	1	29,88
1:00:00	60	9:58:00	4	18,1	15,1	11,1	12,54	0,013	24	12,52	0,0035	0,0067	1	25,08
1:30:00	90	10:28:00	4	17,6	14,6	10,6	12,04	0,013	24	12,60	0,0023	0,0055	1	24,08
2:00:00	120	10:58:00	4	16,3	13,3	9,3	10,74	0,013	24	12,81	0,0018	0,0048	1	21,48
7:00:00	420	15:58:00	4	14,6	11,6	7,6	9,04	0,013	24	13,08	0,0005	0,0026	1	18,08
8:00:00	480	16:58:00	4	13,9	10,9	6,9	8,34	0,013	24	13,20	0,0005	0,0024	1	16,68
0:00:00	1440	8:58:00	4	12,3	9,3	5,3	6,74	0,013	24	13,45	0,0002	0,0014	1	13,48

MUESTRA		Hora Inicial		Cm	Cd	Ct /°C ±20		Wmf (g)		Gs Dens. Sólidos				
TP_01_D4		10:43:30		0,5	3,5	0,36		50		2,65				
Crono exp	Ti	Hora	R _L	R _i	R _c	C	C ₂₀	θ	T ^a	h	V	Diámetro	a	% P.
0:00:20	0,33	10:43:50	4	44,5	41,5	37,5	38,94	0,013	24	8,30	0,4150	0,0735	1	77,88
0:00:30	0,5	10:44:00	4	43,5	40,5	36,5	37,94	0,013	24	8,46	0,2820	0,0605	1	75,88
0:00:40	0,67	10:44:10	4	42,5	39,5	35,5	36,94	0,013	24	8,62	0,2155	0,0529	1	73,88
0:01:00	1,00	10:44:30	4	42	39	35	36,44	0,013	24	8,70	0,1450	0,0434	1	72,88
0:01:30	1,5	10:45:00	4	41,5	38,5	34,5	35,94	0,013	24	8,78	0,0976	0,0356	1	71,88
0:02:00	2	10:45:30	4	40,5	37,5	33,5	34,94	0,013	24	8,94	0,0745	0,0311	1	69,88
0:03:00	3	10:46:30	4	39,5	36,5	32,5	33,94	0,013	24	9,10	0,0506	0,0256	1	67,88
0:10:00	10	10:53:30	4	37,1	34,1	30,1	31,54	0,013	24	9,48	0,0158	0,0143	1	63,08
0:30:00	30	11:13:30	4	34	31	27	28,44	0,013	24	9,98	0,0055	0,0085	1	56,88
1:00:00	60	11:43:30	4	31,3	28,3	24,3	25,74	0,013	24	10,41	0,0029	0,0061	1	51,48
1:30:00	90	12:13:30	4	30,6	27,6	23,6	25,04	0,013	24	10,52	0,0019	0,0050	1	50,08
2:00:00	120	12:43:30	4	28,5	25,5	21,5	22,94	0,013	24	10,86	0,0015	0,0044	1	45,88
7:00:00	420	17:43:30	4	27,2	24,2	20,2	21,64	0,013	24	11,07	0,0004	0,0024	1	43,28
8:00:00	480	18:43:30	3,5	26	23	19,5	21,3	0,0129	25	11,26	0,0004	0,0022	1	42,6
0:00:00	1440	10:43:30	4	24	21	17	18,44	0,013	24	11,58	0,0001	0,0013	1	36,88

▪ TSA_01

MUESTRA		Hora Inicial		Cm	Cd	Ct /°C ±20		Wmf (g)		Gs Dens. Sólidos				
TSA_01_A1		11:50:00		0,5	3,5	0,36		50		2,65				
Crono exp	Ti	Hora	R _L	R _i	R _c	C	C ₂₀	θ	T ^a	h	V	Diámetro	a	% P.
0:00:20	0,33	11:50:20	4	45,5	42,5	38,5	39,94	0,013	24	8,14	0,4070	0,0727	1	79,88
0:00:30	0,5	11:50:30	4	44,5	41,5	37,5	38,94	0,013	24	8,30	0,2767	0,0600	1	77,88
0:00:40	0,67	11:50:40	4	43,8	40,8	36,8	38,24	0,013	24	8,41	0,2103	0,0523	1	76,48
0:01:00	1,00	11:51:00	4	42,6	39,6	35,6	37,04	0,013	24	8,60	0,1434	0,0432	1	74,08
0:01:30	1,5	11:51:30	4	41,5	38,5	34,5	35,94	0,013	24	8,78	0,0976	0,0356	1	71,88
0:02:00	2	11:52:00	4	40	37	33	34,44	0,013	24	9,02	0,0752	0,0313	1	68,88
0:03:00	3	11:53:00	4	38,4	35,4	31,4	32,84	0,013	24	9,28	0,0515	0,0259	1	65,68
0:10:00	10	12:00:00	4	32,2	29,2	25,2	26,64	0,013	24	10,27	0,0171	0,0149	1	53,28
0:30:00	30	12:20:00	4	26,8	23,8	19,8	21,24	0,013	24	11,13	0,0062	0,0090	1	42,48
1:00:00	60	12:50:00	4	23,4	20,4	16,4	17,84	0,013	24	11,68	0,0032	0,0065	1	35,68
1:30:00	90	13:20:00	4	22,2	19,2	15,2	16,64	0,013	24	11,87	0,0022	0,0053	1	33,28
2:00:00	120	13:50:00	4	20,5	17,5	13,5	14,94	0,013	24	12,14	0,0017	0,0047	1	29,88
7:00:00	420	18:50:00	3,5	18	15	11,5	13,3	0,0129	25	12,54	0,0005	0,0025	1	26,6
8:00:00	480	19:50:00	3,5	17	14	10,5	12,3	0,0129	25	12,70	0,0004	0,0024	1	24,6
0:00:00	1440	11:50:00	4	15	12	8	9,44	0,013	24	13,02	0,0002	0,0014	1	18,88

MUESTRA		Hora Inicial		Cm	Cd	Ct /°C ±20		Wmf (g)		Gs Dens. Sólidos				
TSA_01_A3		12:38:00		0,5	3,5	0,36		50		2,65				
Crono exp	Ti	Hora	R _L	R _i	R _c	C	C ₂₀	θ	T ^a	h	V	Diámetro	a	% P.
0:00:20	0,33	12:38:20	4	41,5	38,5	34,5	35,94	0,013	24	8,78	0,4390	0,0755	1	71,88
0:00:30	0,5	12:38:30	4	40,2	37,2	33,2	34,64	0,013	24	8,99	0,2996	0,0624	1	69,28
0:00:40	0,67	12:38:40	4	39,2	36,2	32,2	33,64	0,013	24	9,15	0,2287	0,0545	1	67,28
0:01:00	1,00	12:39:00	4	37,5	34,5	30,5	31,94	0,013	24	9,42	0,1570	0,0452	1	63,88
0:01:30	1,5	12:39:30	4	36,1	33,1	29,1	30,54	0,013	24	9,64	0,1072	0,0373	1	61,08
0:02:00	2	12:40:00	4	35	32	28	29,44	0,013	24	9,82	0,0818	0,0326	1	58,88
0:03:00	3	12:41:00	4	33,5	30,5	26,5	27,94	0,013	24	10,06	0,0559	0,0270	1	55,88
0:10:00	10	12:48:00	4	29,2	26,2	22,2	23,64	0,013	24	10,75	0,0179	0,0153	1	47,28
0:30:00	30	13:08:00	4	25,1	22,1	18,1	19,54	0,013	24	11,40	0,0063	0,0091	1	39,08
1:00:00	60	13:38:00	4	23,5	20,5	16,5	17,94	0,013	24	11,66	0,0032	0,0065	1	35,88
1:30:00	90	14:08:00	4	22,2	19,2	15,2	16,64	0,013	24	11,87	0,0022	0,0053	1	33,28
2:00:00	120	14:38:00	4	21,4	18,4	14,4	15,84	0,013	24	12,00	0,0017	0,0047	1	31,68
7:00:00	420	19:38:00	4	18,5	15,5	11,5	12,94	0,013	24	12,46	0,0005	0,0025	1	25,88
8:00:00	480	20:38:00	4	17,3	14,3	10,3	11,74	0,013	24	12,65	0,0004	0,0024	1	23,48
0:00:00	1440	12:38:00	3,7	16,9	13,9	10,2	11,82	0,01295	24,5	12,72	0,0001	0,0014	1	23,64

MUESTRA		Hora Inicial		Cm	Cd	Ct /°C ±20		Wmf (g)		Gs Dens. Sólidos				
TSA_01_B1		12:14:00		0,5	3,5	0,36		50		2,65				
Crono exp	Ti	Hora	R _L	Ri	Rc	C	C ₂₀	θ	T ^a	h	V	Diámetro	a	% P.
0:00:20	0,33	12:14:20	4	40,5	37,5	33,5	34,94	0,013	24	8,94	0,4470	0,0762	1	69,88
0:00:30	0,5	12:14:30	4	39,8	36,8	32,8	34,24	0,013	24	9,05	0,3017	0,0626	1	68,48
0:00:40	0,67	12:14:40	4	37,8	34,8	30,8	32,24	0,013	24	9,37	0,2343	0,0552	1	64,48
0:01:00	1,00	12:15:00	4	36,9	33,9	29,9	31,34	0,013	24	9,52	0,1586	0,0454	1	62,68
0:01:30	1,5	12:15:30	4	35,2	32,2	28,2	29,64	0,013	24	9,79	0,1088	0,0376	1	59,28
0:02:00	2	12:16:00	4	34	31	27	28,44	0,013	24	9,98	0,0832	0,0329	1	56,88
0:03:00	3	12:17:00	4	32,3	29,3	25,3	26,74	0,013	24	10,25	0,0570	0,0272	1	53,48
0:10:00	10	12:24:00	4	26,5	23,5	19,5	20,94	0,013	24	11,18	0,0186	0,0156	1	41,88
0:30:00	30	12:44:00	4	23,5	20,5	16,5	17,94	0,013	24	11,66	0,0065	0,0092	1	35,88
1:00:00	60	13:14:00	4	20,1	17,1	13,1	14,54	0,013	24	12,20	0,0034	0,0066	1	29,08
1:30:00	90	13:44:00	4	18,2	15,2	11,2	12,64	0,013	24	12,51	0,0023	0,0055	1	25,28
2:00:00	120	14:14:00	4	18	15	11	12,44	0,013	24	12,54	0,0017	0,0048	1	24,88
7:00:00	420	19:14:00	3,5	16	13	9,5	11,3	0,0129	25	12,86	0,0005	0,0026	1	22,6
8:00:00	480	20:14:00	3,5	15	12	8,5	10,3	0,0129	25	13,02	0,0005	0,0024	1	20,6
0:00:00	1440	12:14:00	4	14,6	11,6	7,6	9,04	0,013	24	13,08	0,0002	0,0014	1	18,08

MUESTRA		Hora Inicial		Cm	Cd	Ct /°C ±20		Wmf (g)		Gs Dens. Sólidos				
TSA_01_B3		9:41:00		0,5	3,5	0,36		50		2,65				
Crono exp	Ti	Hora	R _L	Ri	Rc	C	C ₂₀	θ	T ^a	h	V	Diámetro	a	% P.
0:00:20	0,33	9:41:20	4	41,5	38,5	34,5	35,94	0,013	24	8,78	0,4390	0,0755	1	71,88
0:00:30	0,5	9:41:30	4	40,6	37,6	33,6	35,04	0,013	24	8,92	0,2975	0,0622	1	70,08
0:00:40	0,67	9:41:40	4	40	37	33	34,44	0,013	24	9,02	0,2255	0,0541	1	68,88
0:01:00	1,00	9:42:00	4	39,2	36,2	32,2	33,64	0,013	24	9,15	0,1525	0,0445	1	67,28
0:01:30	1,5	9:42:30	4	37,8	34,8	30,8	32,24	0,013	24	9,37	0,1041	0,0368	1	64,48
0:02:00	2	9:43:00	4	36,9	33,9	29,9	31,34	0,013	24	9,52	0,0793	0,0321	1	62,68
0:03:00	3	9:44:00	4	35,5	32,5	28,5	29,94	0,013	24	9,74	0,0541	0,0265	1	59,88
0:10:00	10	9:51:00	4	31,2	28,2	24,2	25,64	0,013	24	10,43	0,0174	0,0150	1	51,28
0:30:00	30	10:11:00	4	25,7	22,7	18,7	20,14	0,013	24	11,31	0,0063	0,0090	1	40,28
1:00:00	60	10:41:00	4	22,4	19,4	15,4	16,84	0,013	24	11,84	0,0033	0,0065	1	33,68
1:30:00	90	11:11:00	3,7	20,1	17,1	13,4	15,02	0,01295	24,5	12,20	0,0023	0,0054	1	30,04
2:00:00	120	11:41:00	3,7	19,1	16,1	12,4	14,02	0,01295	24,5	12,36	0,0017	0,0047	1	28,04
7:00:00	420	16:41:00	3,5	16,3	13,3	9,8	11,6	0,0129	25	12,81	0,0005	0,0026	1	23,2
8:00:00	480	17:41:00	3,5	15,7	12,7	9,2	11	0,0129	25	12,91	0,0004	0,0024	1	22
0:00:00	1440	9:41:00	4	13,5	10,5	6,5	7,94	0,013	24	13,26	0,0002	0,0014	1	15,88

MUESTRA		Hora Inicial		Cm	Cd	Ct /°C ±20		Wmf (g)		Gs Dens. Sólidos				
TSA_01_B4		11:18:00		0,5	3,5	0,36		50		2,65				
Crono exp	Ti	Hora	R _L	Ri	Rc	C	C ₂₀	θ	T ^a	h	V	Diámetro	a	% P.
0:00:20	0,33	11:18:20	3,7	46	43	39,3	40,92	0,01295	24,5	8,06	0,4030	0,0722	1	81,84
0:00:30	0,5	11:18:30	3,7	44,5	41,5	37,8	39,42	0,01295	24,5	8,30	0,2767	0,0599	1	78,84
0:00:40	0,67	11:18:40	3,7	43,2	40,2	36,5	38,12	0,01295	24,5	8,51	0,2127	0,0525	1	76,24
0:01:00	1,00	11:19:00	3,7	42,8	39,8	36,1	37,72	0,01295	24,5	8,57	0,1429	0,0430	1	75,44
0:01:30	1,5	11:19:30	3,7	40,5	37,5	33,8	35,42	0,01295	24,5	8,94	0,0993	0,0359	1	70,84
0:02:00	2	11:20:00	3,7	39,5	36,5	32,8	34,42	0,01295	24,5	9,10	0,0758	0,0313	1	68,84
0:03:00	3	11:21:00	3,7	38,3	35,3	31,6	33,22	0,01295	24,5	9,29	0,0516	0,0259	1	66,44
0:10:00	10	11:28:00	3,7	36,2	33,2	29,5	31,12	0,01295	24,5	9,63	0,0160	0,0144	1	62,24
0:30:00	30	11:48:00	3,7	35,1	32,1	28,4	30,02	0,01295	24,5	9,80	0,0054	0,0084	1	60,04
1:00:00	60	12:18:00	3,7	34	31	27,3	28,92	0,01295	24,5	9,98	0,0028	0,0060	1	57,84
1:30:00	90	12:48:00	3,7	33,5	30,5	26,8	28,42	0,01295	24,5	10,06	0,0019	0,0049	1	56,84
2:00:00	120	13:18:00	3,7	32,9	29,9	26,2	27,82	0,01295	24,5	10,16	0,0014	0,0043	1	55,64
7:00:00	420	18:18:00	3,5	31,9	28,9	25,4	27,2	0,0129	25	10,32	0,0004	0,0023	1	54,4
8:00:00	480	19:18:00	3,5	31,2	28,2	24,7	26,5	0,0129	25	10,43	0,0004	0,0022	1	53
0:00:00	1440	11:18:00	4	30	27	23	24,44	0,013	24	10,62	0,0001	0,0013	1	48,88

▪ MC_02

MUESTRA		Hora Inicial		Cm	Cd	Ct /°C ±20		Wmf (g)		Gs Dens. Sólidos				
MC_02_A1		10:22:00		0,5	3,5	0,36		50		2,65				
Crono exp	Ti	Hora	RL	Ri	Rc	C	C20	θ	Tª	h	V	Diámetr	a	% P.
0:00:20	0,33	10:22:20	4	35	32	28	29,44	0,013	24	9,82	0,4910	0,0799	1	58,88
0:00:30	0,5	10:22:30	4	33,2	30,2	26,2	27,64	0,013	24	10,11	0,3369	0,0662	1	55,28
0:00:40	0,67	10:22:40	4	32	29	25	26,44	0,013	24	10,30	0,2575	0,0579	1	52,88
0:01:00	1,00	10:23:00	4	31	28	24	25,44	0,013	24	10,46	0,1743	0,0476	1	50,88
0:01:30	1,5	10:23:30	4	29,5	26,5	22,5	23,94	0,013	24	10,70	0,1189	0,0393	1	47,88
0:02:00	2	10:24:00	4	28,5	25,5	21,5	22,94	0,013	24	10,86	0,0905	0,0343	1	45,88
0:03:00	3	10:25:00	4	27,5	24,5	20,5	21,94	0,013	24	11,02	0,0612	0,0282	1	43,88
0:10:00	10	10:32:00	4	24	21	17	18,44	0,013	24	11,58	0,0193	0,0158	1	36,88
0:30:00	30	10:52:00	4	20,3	17,3	13,3	14,74	0,013	24	12,17	0,0068	0,0094	1	29,48
1:00:00	60	11:22:00	4	18,85	15,85	11,85	13,29	0,013	24	12,40	0,0034	0,0067	1	26,58
1:30:00	90	11:52:00	4	17,2	14,2	10,2	11,64	0,013	24	12,67	0,0023	0,0055	1	23,28
2:00:00	120	12:22:00	4	16,2	13,2	9,2	10,64	0,013	24	12,83	0,0018	0,0048	1	21,28
7:00:00	420	17:22:00	4	13	10	6	7,44	0,013	24	13,34	0,0005	0,0026	1	14,88
8:00:00	480	18:22:00	4	12,8	9,8	5,8	7,24	0,013	24	13,37	0,0005	0,0025	1	14,48
0:00:00	1440	10:22:00	4	10,6	7,6	3,6	5,04	0,013	24	13,72	0,0002	0,0014	1	10,08
MUESTRA		Hora Inicial		Cm	Cd	Ct /°C ±20		Wmf (g)		Gs Dens. Sólidos				
MC_02_A2		10:34:00		0,5	3,5	0,36		50		2,65				
Crono exp	Ti	Hora	RL	Ri	Rc	C	C20	θ	Tª	h	V	Diámetr	a	% P.
0:00:20	0,33	10:34:20	4	37	34	30	27,44	0,013	24	9,5	0,4750	0,0786	1	62,88
0:00:30	0,5	10:34:30	4	35	32	28	25,94	0,013	24	9,82	0,3273	0,0652	1	58,88
0:00:40	0,67	10:34:40	4	33	30	26	24,24	0,013	24	10,14	0,2535	0,0574	1	54,88
0:01:00	1,00	10:35:00	4	31,5	28,5	24,5	22,94	0,013	24	10,38	0,1730	0,0474	1	51,88
0:01:30	1,5	10:35:30	4	29,8	26,8	22,8	21,74	0,013	24	10,65	0,1184	0,0392	1	48,48
0:02:00	2	10:36:00	4	28,5	25,5	21,5	18,94	0,013	24	10,86	0,0905	0,0343	1	45,88
0:03:00	3	10:37:00	4	27,3	24,3	20,3	14,54	0,013	24	11,05	0,0614	0,0283	1	43,48
0:10:00	10	10:44:00	4	24,5	21,5	17,5	12,84	0,013	24	11,50	0,0192	0,0158	1	37,88
0:30:00	30	11:04:00	4	20,1	17,1	13,1	11,24	0,013	24	12,20	0,0068	0,0094	1	29,08
1:00:00	60	11:34:00	4	18,4	15,4	11,4	10,44	0,013	24	12,48	0,0035	0,0067	1	25,68
1:30:00	90	12:04:00	4	16,8	13,8	9,8	6,74	0,013	24	12,73	0,0024	0,0055	1	22,48
2:00:00	120	12:34:00	4	16	13	9	6,34	0,013	24	12,86	0,0018	0,0048	1	20,88
7:00:00	420	17:34:00	4	12,3	9,3	5,3	4,14	0,013	24	13,45	0,0005	0,0026	1	13,48
8:00:00	480	18:34:00	4	11,9	8,9	4,9	6,34	0,013	24	13,52	0,0005	0,0025	1	12,68
0:00:00	1440	10:34:00	4	9,7	6,7	2,7	4,14	0,013	24	13,87	0,0002	0,0014	1	8,28
MUESTRA		Hora Inicial		Cm	Cd	Ct /°C ±20		Wmf (g)		Gs Dens. Sólidos				
MC_02_A3		11:27:00		0,5	3,5	0,36		50		2,65				
Crono exp	Ti	Hora	RL	Ri	Rc	C	C20	θ	Tª	h	V	Diámetr	a	% P.
0:00:20	0,33	11:27:20	4	44	41	37	38,44	0,013	24	8,38	0,4190	0,0738	1	76,88
0:00:30	0,5	11:27:30	4	42,5	39,5	35,5	36,94	0,013	24	8,62	0,2873	0,0611	1	73,88
0:00:40	0,67	11:27:40	4	41,5	38,5	34,5	35,94	0,013	24	8,78	0,2195	0,0534	1	71,88
0:01:00	1,00	11:28:00	4	40	37	33	34,44	0,013	24	9,02	0,1503	0,0442	1	68,88
0:01:30	1,5	11:28:30	4	38,2	35,2	31,2	32,64	0,013	24	9,31	0,1034	0,0367	1	65,28
0:02:00	2	11:29:00	4	37,1	34,1	30,1	31,54	0,013	24	9,48	0,0790	0,0321	1	63,08
0:03:00	3	11:30:00	4	35,5	32,5	28,5	29,94	0,013	24	9,74	0,0541	0,0265	1	59,88
0:10:00	10	11:37:00	4	31	28	24	25,44	0,013	24	10,46	0,0174	0,0151	1	50,88
0:30:00	30	11:57:00	4	28	25	21	22,44	0,013	24	10,94	0,0061	0,0089	1	44,88
1:00:00	60	12:27:00	4	25	22	18	19,44	0,013	24	11,42	0,0032	0,0064	1	38,88
1:30:00	90	12:57:00	4	23,5	20,5	16,5	17,94	0,013	24	11,66	0,0022	0,0053	1	35,88
2:00:00	120	13:27:00	4	22,2	19,2	15,2	16,64	0,013	24	11,87	0,0016	0,0046	1	33,28
7:00:00	420	18:27:00	4	19,6	16,6	12,6	14,04	0,013	24	12,28	0,0005	0,0025	1	28,08
8:00:00	480	19:27:00	4	18,5	15,5	11,5	12,94	0,013	24	12,46	0,0004	0,0024	1	25,88
0:00:00	1440	11:27:00	4	16,5	13,5	9,5	10,94	0,013	24	12,78	0,0001	0,0014	1	21,88

MUESTRA		Hora Inicial		Cm	Cd	Ct /°C ±20		Wmf (g)		Gs Dens. Sólidos				
MC_02_B4		9:54:00		0,5	3,5	0,36		50		2,65				
Crono exp	Ti	Hora	RL	Ri	Rc	C	C20	θ	Tª	h	V	Diámetr	a	% P.
0:00:20	0,33	9:54:20	4	44,2	41,2	37,2	38,64	0,013	24	8,35	0,4174	0,0737	1	77,28
0:00:30	0,5	9:54:30	4	43,5	40,5	36,5	37,94	0,013	24	8,46	0,2820	0,0605	1	75,88
0:00:40	0,67	9:54:40	4	43	40	36	37,44	0,013	24	8,54	0,2135	0,0527	1	74,88
0:01:00	1,00	9:55:00	4	42,5	39,5	35,5	36,94	0,013	24	8,62	0,1437	0,0432	1	73,88
0:01:30	1,5	9:55:30	4	41,8	38,8	34,8	36,24	0,013	24	8,73	0,0970	0,0355	1	72,48
0:02:00	2	9:56:00	4	41,5	38,5	34,5	35,94	0,013	24	8,78	0,0732	0,0308	1	71,88
0:03:00	3	9:57:00	4	40,5	37,5	33,5	34,94	0,013	24	8,94	0,0497	0,0254	1	69,88
0:10:00	10	10:04:00	4	39,1	36,1	32,1	33,54	0,013	24	9,16	0,0153	0,0141	1	67,08
0:30:00	30	10:24:00	4	38,2	35,2	31,2	32,64	0,013	24	9,31	0,0052	0,0082	1	65,28
1:00:00	60	10:54:00	4	37,1	34,1	30,1	31,54	0,013	24	9,48	0,0026	0,0059	1	63,08
1:30:00	90	11:24:00	4	36,5	33,5	29,5	30,94	0,013	24	9,58	0,0018	0,0048	1	61,88
2:00:00	120	11:54:00	4	35,5	32,5	28,5	29,94	0,013	24	9,74	0,0014	0,0042	1	59,88
7:00:00	420	16:54:00	4	35	32	28	29,44	0,013	24	9,82	0,0004	0,0023	1	58,88
8:00:00	480	17:54:00	4	34,7	31,7	27,7	29,14	0,013	24	9,87	0,0003	0,0021	1	58,28
0:00:00	1440	9:54:00	4	34	31	27	28,44	0,013	24	9,98	0,0001	0,0012	1	56,88

▪ TP_02

MUESTRA		Hora Inicial		Cm	Cd	Ct /°C ±20		Wmf (g)		Gs Dens. Sólidos				
TP_02_A1		10:20:00		0,5	3,5	0,36		50		2,65				
Crono exp	Ti	Hora	RL	Ri	Rc	C	C20	θ	Tª	h	V	Diámetr	a	% P.
0:00:20	0,33	10:20:20	4	38	35	31	32,44	0,013	24	9,34	0,4670	0,079	1	64,88
0:00:30	0,5	10:20:30	4	35,8	32,8	28,8	30,24	0,013	24	9,69	0,3231	0,0648	1	60,48
0:00:40	0,67	10:20:40	4	34	31	27	28,44	0,013	24	9,98	0,2495	0,0570	1	56,88
0:01:00	1,00	10:21:00	4	32,1	29,1	25,1	26,54	0,013	24	10,28	0,1714	0,0472	1	53,08
0:01:30	1,5	10:21:30	4	30,8	27,8	23,8	25,24	0,013	24	10,49	0,1166	0,0389	1	50,48
0:02:00	2	10:22:00	4	29,5	26,5	22,5	23,94	0,013	24	10,70	0,0892	0,0340	1	47,88
0:03:00	3	10:23:00	4	28	25	21	22,44	0,013	24	10,94	0,0608	0,0281	1	44,88
0:10:00	10	10:30:00	4	25	22	18	19,44	0,013	24	11,42	0,0190	0,0157	1	38,88
0:30:00	30	10:50:00	4	23,3	20,3	16,3	17,74	0,013	24	11,69	0,0065	0,0092	1	35,48
1:00:00	60	11:20:00	4	21	18	14	15,44	0,013	24	12,06	0,0034	0,0066	1	30,88
1:30:00	90	11:50:00	4	19	16	12	13,44	0,013	24	12,38	0,0023	0,0055	1	26,88
2:00:00	120	12:20:00	4	18,6	15,6	11,6	13,04	0,013	24	12,44	0,0017	0,0047	1	26,08
7:00:00	420	17:20:00	4	16,2	13,2	9,2	10,64	0,013	24	12,83	0,0005	0,0026	1	21,28
8:00:00	480	18:20:00	4	16	13	9	10,44	0,013	24	12,86	0,0004	0,0024	1	20,88
0:00:00	1440	10:20:00	4	15,8	12,8	8,8	10,24	0,013	24	12,89	0,0001	0,0014	1	20,48

MUESTRA		Hora Inicial		Cm	Cd	Ct /°C ±20		Wmf (g)		Gs Dens. Sólidos				
TP_02_A3		11:03:00		0,5	3,5	0,36		50		2,65				
Crono exp	Ti	Hora	RL	Ri	Rc	C	C20	θ	Tª	h	V	Diámetr	a	% P.
0:00:20	0,33	11:03:20	4	40,5	37,5	33,5	34,94	0,013	24	8,94	0,4470	0,0762	1	69,88
0:00:30	0,5	11:03:30	4	38,8	35,8	31,8	33,24	0,013	24	9,21	0,3071	0,0632	1	66,48
0:00:40	0,67	11:03:40	4	37,5	34,5	30,5	31,94	0,013	24	9,42	0,2355	0,0553	1	63,88
0:01:00	1,00	11:04:00	4	36,8	33,8	29,8	31,24	0,013	24	9,53	0,1589	0,0454	1	62,48
0:01:30	1,5	11:04:30	4	34	31	27	28,44	0,013	24	9,98	0,1109	0,0380	1	56,88
0:02:00	2	11:05:00	4	32,7	29,7	25,7	27,14	0,013	24	10,19	0,0849	0,0332	1	54,28
0:03:00	3	11:06:00	4	31,2	28,2	24,2	25,64	0,013	24	10,43	0,0579	0,0274	1	51,28
0:10:00	10	11:13:00	4	28,5	25,5	21,5	22,94	0,013	24	10,86	0,0181	0,0153	1	45,88
0:30:00	30	11:33:00	4	24,4	21,4	17,4	18,84	0,013	24	11,52	0,0064	0,0091	1	37,68
1:00:00	60	12:03:00	4	21	18	14	15,44	0,013	24	12,06	0,0034	0,0066	1	30,88
1:30:00	90	12:33:00	4	20,6	17,6	13,6	15,04	0,013	24	12,12	0,0022	0,0054	1	30,08
2:00:00	120	13:03:00	4	19,7	16,7	12,7	14,14	0,013	24	12,27	0,0017	0,0047	1	28,28
7:00:00	420	18:03:00	4	17,5	14,5	10,5	11,94	0,013	24	12,62	0,0005	0,0026	1	23,88
8:00:00	480	19:03:00	4	16,5	13,5	9,5	10,94	0,013	24	12,78	0,0004	0,0024	1	21,88
0:00:00	1440	11:03:00	4	15,2	12,2	8,2	9,64	0,013	24	12,99	0,0002	0,0014	1	19,28

MUESTRA		Hora Inicial		Cm	Cd	Ct /°C ±20		Wmf (g)		Gs Dens. Sólidos				
TP_02_A4		10:55:00		0,5	3,5	0,36		50		2,65				
Crono exp	Ti	Hora	RL	Ri	Rc	C	C20	θ	Tª	h	V	Diámet	a	% P.
0:00:20	0,33	10:55:20	6	42	39	33	33,72	0,0133	22	8,7	0,4350	0,0761	1	67,44
0:00:30	0,5	10:55:30	6	41,2	38,2	32,2	32,92	0,0133	22	8,83	0,2943	0,0626	1	65,84
0:00:40	0,67	10:55:40	6	40,5	37,5	31,5	32,22	0,0133	22	8,94	0,2235	0,0545	1	64,44
0:01:00	1,00	10:56:00	6	39,8	36,8	30,8	31,52	0,0133	22	9,05	0,1509	0,0448	1	63,04
0:01:30	1,5	10:56:30	6	38,8	35,8	29,8	30,52	0,0133	22	9,21	0,1024	0,0369	1	61,04
0:02:00	2	10:57:00	6	38,2	35,2	29,2	29,92	0,0133	22	9,31	0,0776	0,0321	1	59,84
0:03:00	3	10:58:00	6	37,5	34,5	28,5	29,22	0,0133	22	9,42	0,0523	0,0264	1	58,44
0:10:00	10	11:05:00	6	36,3	33,3	27,3	28,02	0,0133	22	9,61	0,0160	0,0146	1	56,04
0:30:00	30	11:25:00	6	34,7	31,7	25,7	26,42	0,0133	22	9,87	0,0055	0,0085	1	52,84
1:00:00	60	11:55:00	6	33,5	30,5	24,5	25,22	0,0133	22	10,06	0,0028	0,0061	1	50,44
1:30:00	90	12:25:00	6	32,3	29,3	23,3	24,02	0,0133	22	10,25	0,0019	0,0050	1	48,04
2:00:00	120	12:55:00	6	31,8	28,8	22,8	23,52	0,0133	22	10,33	0,0014	0,0044	1	47,04
7:00:00	420	17:55:00	5	30,3	27,3	22,3	23,38	0,0132	23	10,57	0,0004	0,0024	1	46,76
8:00:00	480	18:55:00	5	29,8	26,8	21,8	22,88	0,0132	23	10,65	0,0004	0,0022	1	45,76
0:00:00	1440	10:55:00	6	29	26	20	20,72	0,0133	22	10,78	0,0001	0,0013	1	41,44

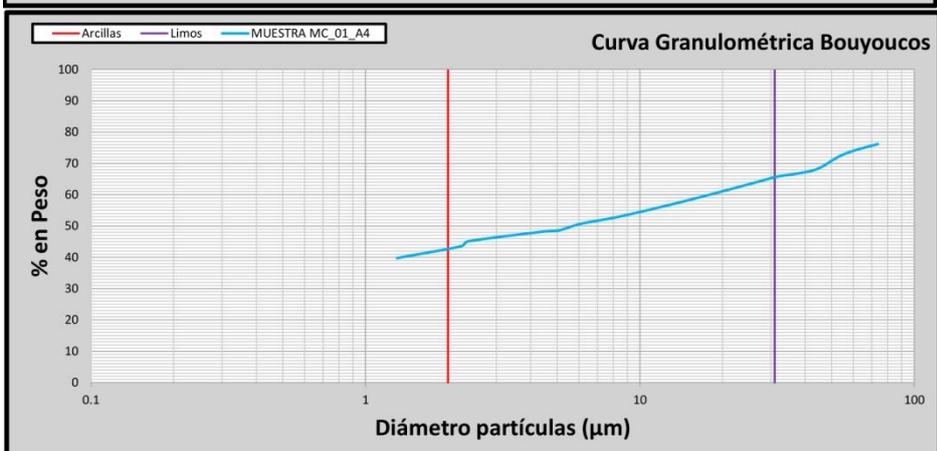
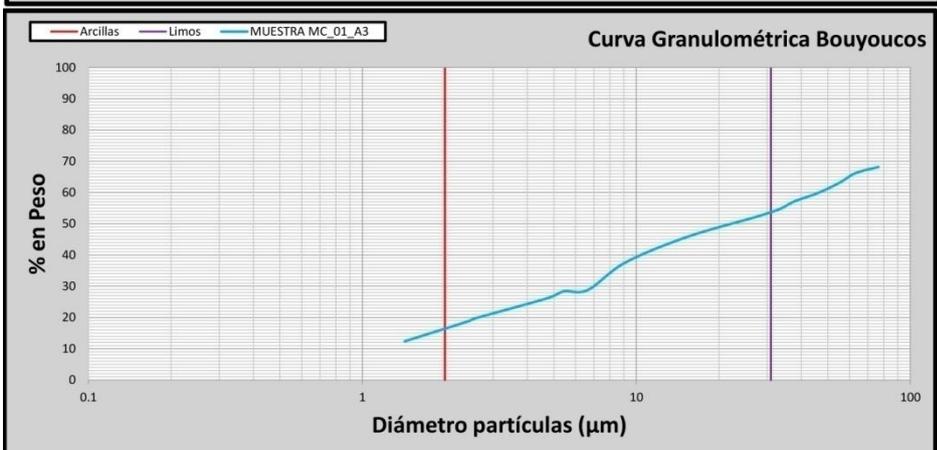
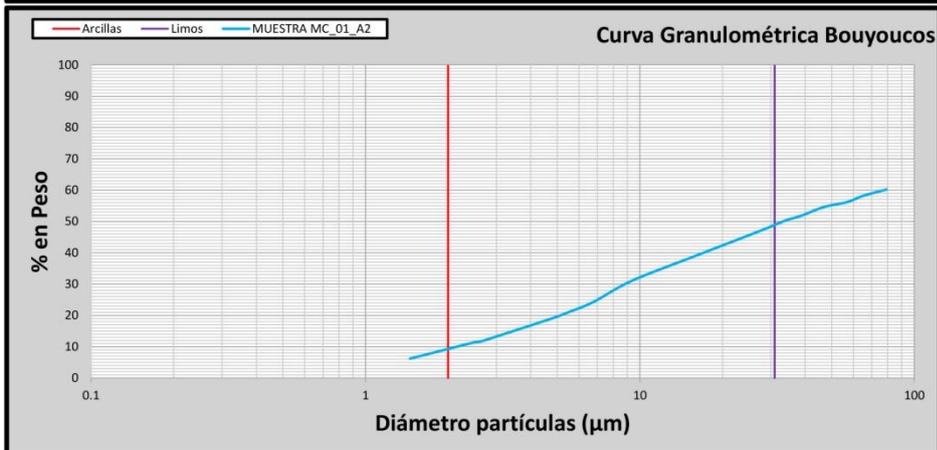
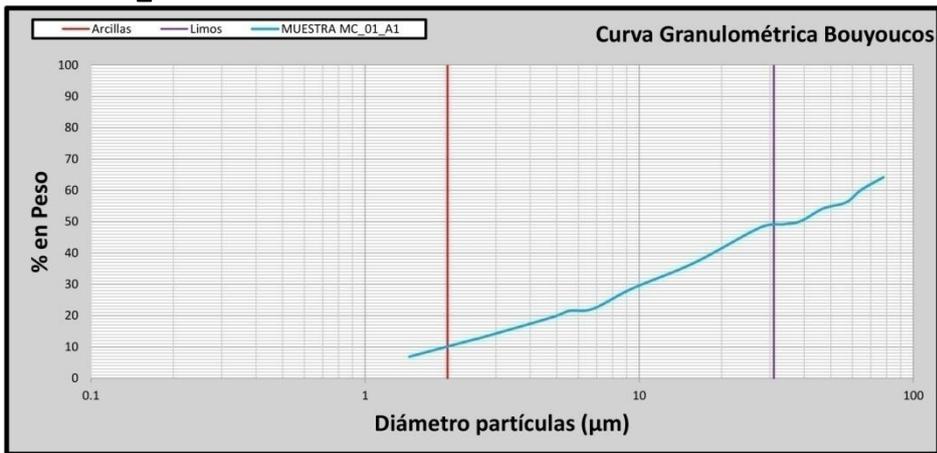
▪ TSA_02

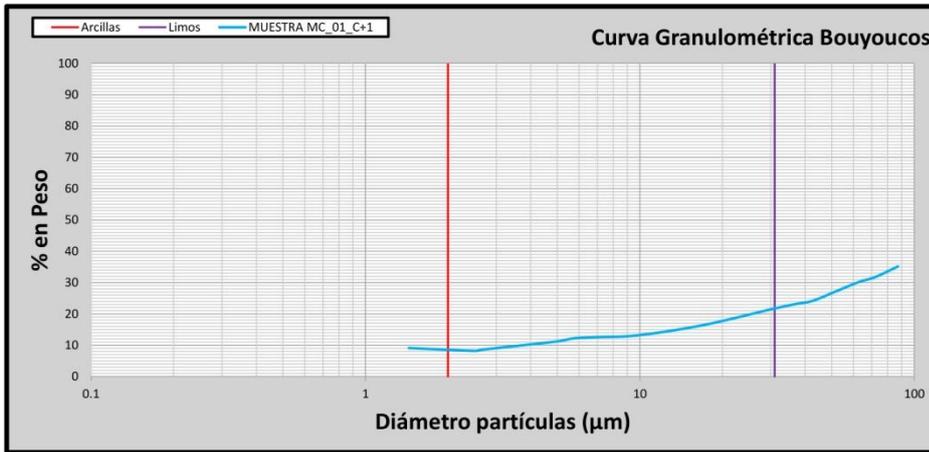
MUESTRA		Hora Inicial		Cm	Cd	Ct /°C ±20		Wmf (g)		Gs Dens. Sólidos				
TSA_02_A1		11:31:00		0,5	3,5	0,36		50		2,65				
Crono exp	Ti	Hora	RL	Ri	Rc	C	C20	θ	Tª	h	V	Diámet	a	% P.
0:00:20	0,33	11:31:20	3,7	38,5	35,5	31,8	33,42	0,01295	24,5	9,26	0,4630	0,0774	1	66,84
0:00:30	0,5	11:31:30	3,7	37	34	30,3	31,92	0,01295	24,5	9,50	0,3167	0,0640	1	63,84
0:00:40	0,67	11:31:40	3,7	36,3	33,3	29,6	31,22	0,01295	24,5	9,61	0,2403	0,0558	1	62,44
0:01:00	1,00	11:32:00	3,7	35,1	32,1	28,4	30,02	0,01295	24,5	9,80	0,1634	0,0460	1	60,04
0:01:30	1,5	11:32:30	3,7	34,5	31,5	27,8	29,42	0,01295	24,5	9,90	0,1100	0,0377	1	58,84
0:02:00	2	11:33:00	3,7	33	30	26,3	27,92	0,01295	24,5	10,14	0,0845	0,0331	1	55,84
0:03:00	3	11:34:00	3,7	31,8	28,8	25,1	26,72	0,01295	24,5	10,33	0,0574	0,0273	1	53,44
0:10:00	10	11:41:00	3,7	29,1	26,1	22,4	24,02	0,01295	24,5	10,76	0,0179	0,0152	1	48,04
0:30:00	30	12:01:00	3,7	25,5	22,5	18,8	20,42	0,01295	24,5	11,34	0,0063	0,0090	1	40,84
1:00:00	60	12:31:00	3,7	23,2	20,2	16,5	18,12	0,01295	24,5	11,71	0,0033	0,0065	1	36,24
1:30:00	90	13:01:00	3,7	22	19	15,3	16,92	0,01295	24,5	11,90	0,0022	0,0053	1	33,84
2:00:00	120	13:31:00	3,7	20,5	17,5	13,8	15,42	0,01295	24,5	12,14	0,0017	0,0047	1	30,84
7:00:00	420	18:31:00	3,5	19	16	12,5	14,3	0,0129	25	12,38	0,0005	0,0025	1	28,6
8:00:00	480	19:31:00	3,5	18,5	15,5	12	13,8	0,0129	25	12,46	0,0004	0,0024	1	27,6
0:00:00	1440	11:31:00	4	16,8	13,8	9,8	11,24	0,013	24	12,73	0,0001	0,0014	1	22,48

MUESTRA		Hora Inicial		Cm	Cd	Ct /°C ±20		Wmf (g)		Gs Dens. Sólidos				
TSA_02_A2		11:07:00		0,5	3,5	0,36		50		2,65				
Crono exp	Ti	Hora	RL	Ri	Rc	C	C20	θ	Tª	h	V	Diámet	a	% P.
0:00:20	0,33	11:07:20	6	43,2	40,2	34,2	34,92	0,0133	22	8,51	0,4254	0,0752	1	69,84
0:00:30	0,5	11:07:30	6	42,1	39,1	33,1	33,82	0,0133	22	8,68	0,2895	0,0620	1	67,64
0:00:40	0,67	11:07:40	6	41	38	32	32,72	0,0133	22	8,86	0,2215	0,0543	1	65,44
0:01:00	1,00	11:08:00	6	39,9	36,9	30,9	31,62	0,0133	22	9,04	0,1506	0,0448	1	63,24
0:01:30	1,5	11:08:30	6	38,3	35,3	29,3	30,02	0,0133	22	9,29	0,1032	0,0371	1	60,04
0:02:00	2	11:09:00	6	37,5	34,5	28,5	29,22	0,0133	22	9,42	0,0785	0,0323	1	58,44
0:03:00	3	11:10:00	6	36,1	33,1	27,1	27,82	0,0133	22	9,64	0,0536	0,0267	1	55,64
0:10:00	10	11:17:00	6	32	29	23	23,72	0,0133	22	10,30	0,0172	0,0151	1	47,44
0:30:00	30	11:37:00	6	27,5	24,5	18,5	19,22	0,0133	22	11,02	0,0061	0,0090	1	38,44
1:00:00	60	12:07:00	6	25	22	16	16,72	0,0133	22	11,42	0,0032	0,0065	1	33,44
1:30:00	90	12:37:00	6	23,2	20,2	14,2	14,92	0,0133	22	11,71	0,0022	0,0054	1	29,84
2:00:00	120	13:07:00	6	22,1	19,1	13,1	13,82	0,0133	22	11,88	0,0017	0,0047	1	27,64
7:00:00	420	18:07:00	5	19,7	16,7	11,7	12,78	0,0132	23	12,27	0,0005	0,0025	1	25,56
8:00:00	480	19:07:00	5	19,2	16,2	11,2	12,28	0,0132	23	12,35	0,0004	0,0024	1	24,56
0:00:00	1440	11:07:00	6	17,1	14,1	8,1	8,82	0,0133	22	12,68	0,0001	0,0014	1	17,64

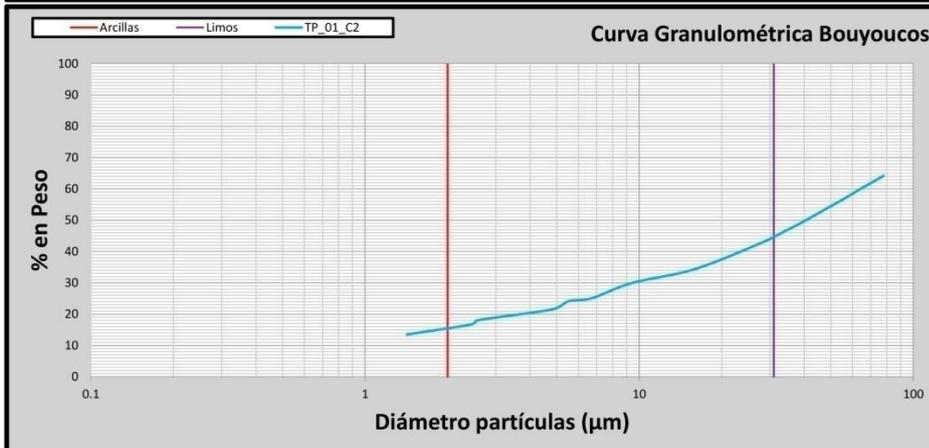
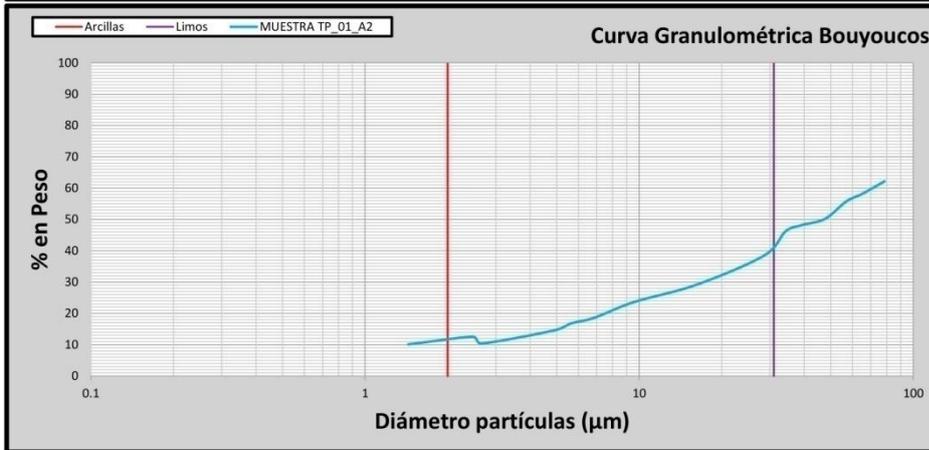
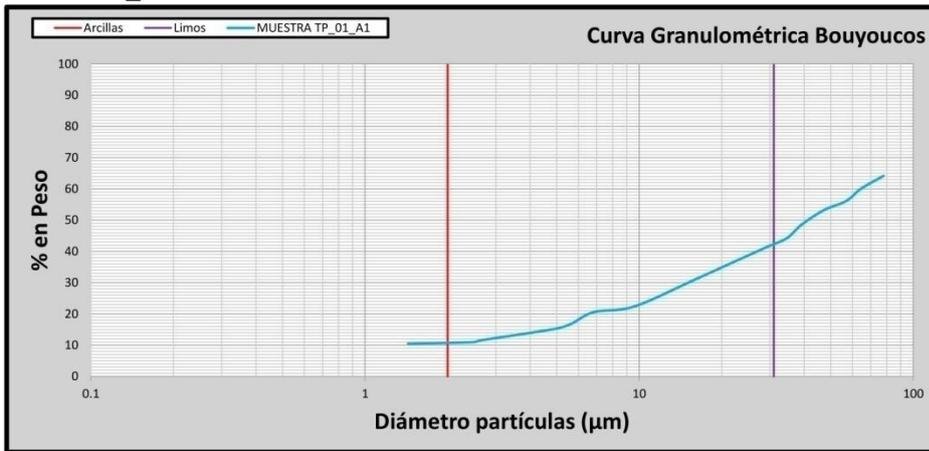
MUESTRA		Hora Inicial		Cm	Cd	Ct /°C ±20		Wmf (g)		Gs Dens. Sólidos				
TSA_02_A3		11:46:00		0,5	3,5	0,36		50		2,65				
Crono exp	Ti	Hora	RL	Ri	Rc	C	C20	θ	Tª	h	V	Diámet	a	% P.
0:00:20	0,33	11:46:20	6	43,5	40,5	34,5	35,22	0,0133	22	8,46	0,4230	0,0750	1	70,44
0:00:30	0,5	11:46:30	6	42,8	39,8	33,8	34,52	0,0133	22	8,57	0,2857	0,0616	1	69,04
0:00:40	0,67	11:46:40	6	42	39	33	33,72	0,0133	22	8,70	0,2175	0,0538	1	67,44
0:01:00	1,00	11:47:00	6	41	38	32	32,72	0,0133	22	8,86	0,1477	0,0443	1	65,44
0:01:30	1,5	11:47:30	6	39,2	36,2	30,2	30,92	0,0133	22	9,15	0,1016	0,0368	1	61,84
0:02:00	2	11:48:00	6	38,5	35,5	29,5	30,22	0,0133	22	9,26	0,0772	0,0320	1	60,44
0:03:00	3	11:49:00	6	37,3	34,3	28,3	29,02	0,0133	22	9,45	0,0525	0,0264	1	58,04
0:10:00	10	11:56:00	6	32,3	29,3	23,3	24,02	0,0133	22	10,25	0,0171	0,0151	1	48,04
0:30:00	30	12:16:00	6	27,2	24,2	18,2	18,92	0,0133	22	11,07	0,0061	0,0090	1	37,84
1:00:00	60	12:46:00	6	23,8	20,8	14,8	15,52	0,0133	22	11,61	0,0032	0,0065	1	31,04
1:30:00	90	13:16:00	6	22	19	13	13,72	0,0133	22	11,90	0,0022	0,0054	1	27,44
2:00:00	120	13:46:00	6	20,4	17,4	11,4	12,12	0,0133	22	12,16	0,0017	0,0047	1	24,24
7:00:00	420	18:46:00	5	17,5	14,5	9,5	10,58	0,0132	23	12,62	0,0005	0,0026	1	21,16
8:00:00	480	19:46:00	5	17,1	14,1	9,1	10,18	0,0132	23	12,68	0,0004	0,0024	1	20,36
0:00:00	1440	11:46:00	6	15,1	12,1	6,1	6,82	0,0133	22	13,00	0,0002	0,0014	1	13,64
MUESTRA		Hora Inicial		Cm	Cd	Ct /°C ±20		Wmf (g)		Gs Dens. Sólidos				
TSA_02_A4		12:02:00		0,5	3,5	0,36		50		2,65				
Crono exp	Ti	Hora	RL	Ri	Rc	C	C20	θ	Tª	h	V	Diámet	a	% P.
0:00:20	0,33	12:02:20	6	46	43	37	37,72	0,0133	22	8,06	0,4030	0,0732	1	75,44
0:00:30	0,5	12:02:30	6	45	42	36	36,72	0,0133	22	8,22	0,2740	0,0604	1	73,44
0:00:40	0,67	12:02:40	6	44,5	41,5	35,5	36,22	0,0133	22	8,30	0,2075	0,0525	1	72,44
0:01:00	1,00	12:03:00	6	44	41	35	35,72	0,0133	22	8,38	0,1397	0,0431	1	71,44
0:01:30	1,5	12:03:30	6	43,5	40,5	34,5	35,22	0,0133	22	8,46	0,0940	0,0354	1	70,44
0:02:00	2	12:04:00	6	42,8	39,8	33,8	34,52	0,0133	22	8,57	0,0714	0,0308	1	69,04
0:03:00	3	12:05:00	6	42,1	39,1	33,1	33,82	0,0133	22	8,68	0,0482	0,0253	1	67,64
0:10:00	10	12:12:00	6	41,3	38,3	32,3	33,02	0,0133	22	8,81	0,0147	0,0140	1	66,04
0:30:00	30	12:32:00	6	40,5	37,5	31,5	32,22	0,0133	22	8,94	0,0050	0,0081	1	64,44
1:00:00	60	13:02:00	6	38,6	35,6	29,6	30,32	0,0133	22	9,24	0,0026	0,0058	1	60,64
1:30:00	90	13:32:00	6	38,3	35,3	29,3	30,02	0,0133	22	9,29	0,0017	0,0048	1	60,04
2:00:00	120	14:02:00	6	37,5	34,5	28,5	29,22	0,0133	22	9,42	0,0013	0,0042	1	58,44
7:00:00	420	19:02:00	5	37	34	29	30,08	0,0132	23	9,50	0,0004	0,0022	1	60,16
8:00:00	480	20:02:00	5	36,7	33,7	28,7	29,78	0,0132	23	9,55	0,0003	0,0021	1	59,56
0:00:00	1440	12:02:00	6	35,5	32,5	26,5	27,22	0,0133	22	9,74	0,0001	0,0012	1	54,44

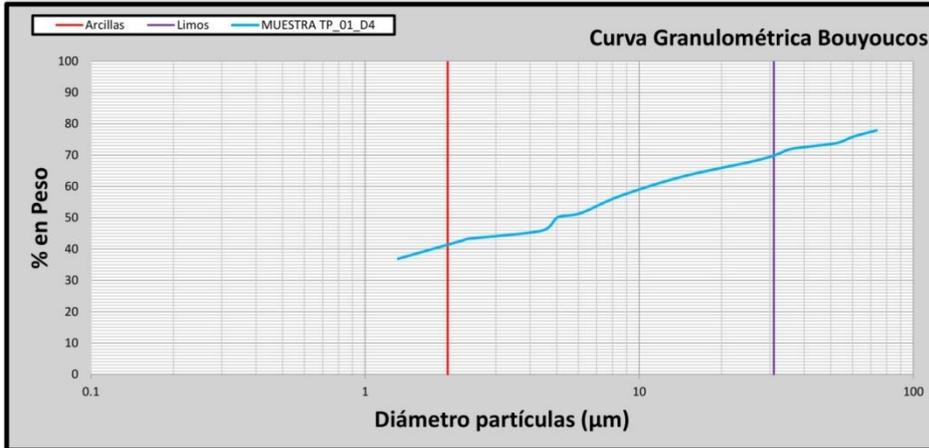
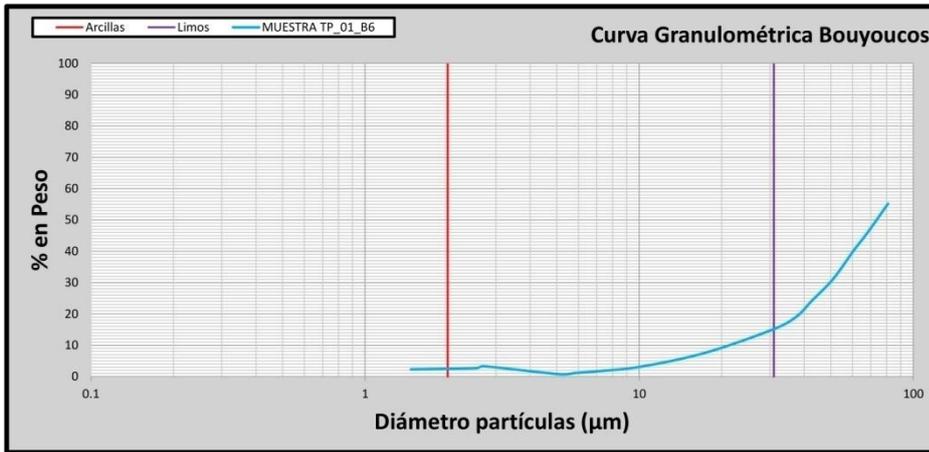
- **Curvas Granulométricas Fracción Fina.** Para las curvas granulométricas se graficaron los resultados de diámetro y porcentaje en peso (X,Y)
 - **MC_01**



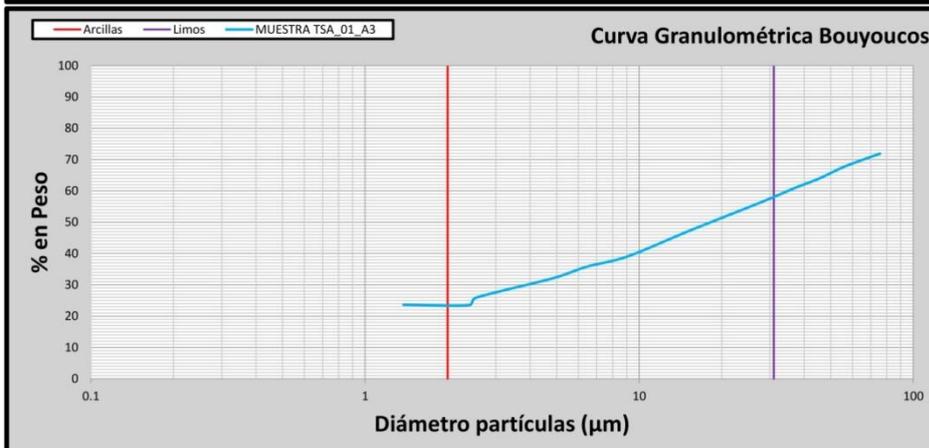
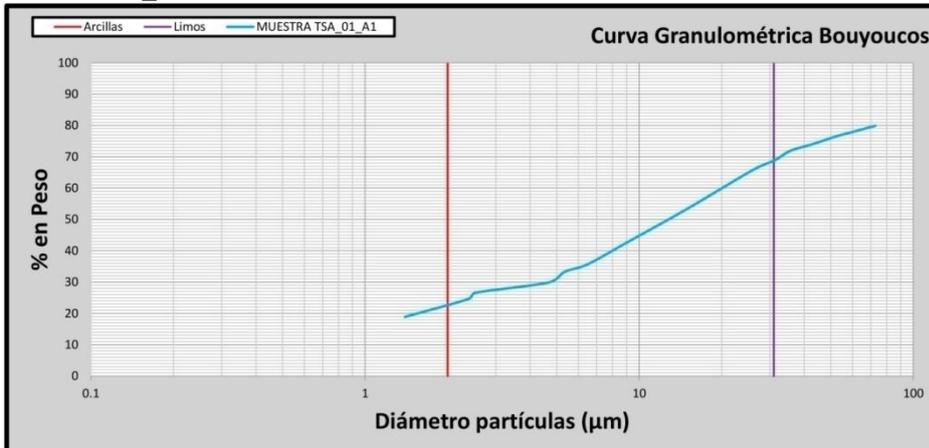


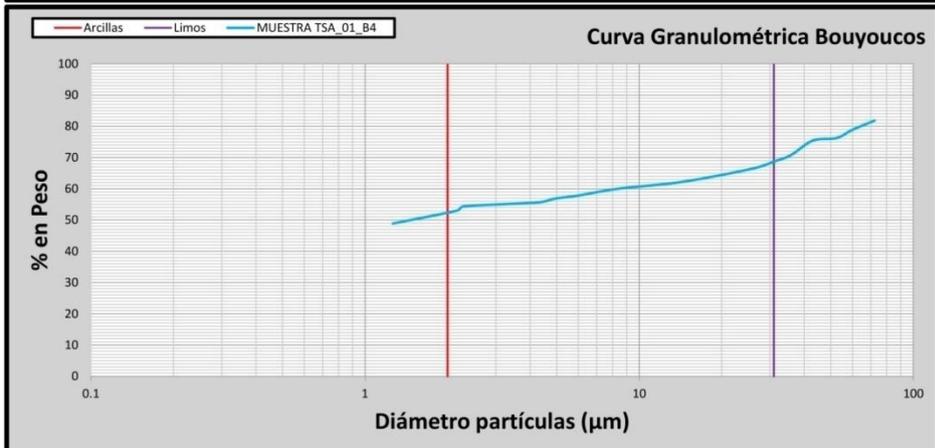
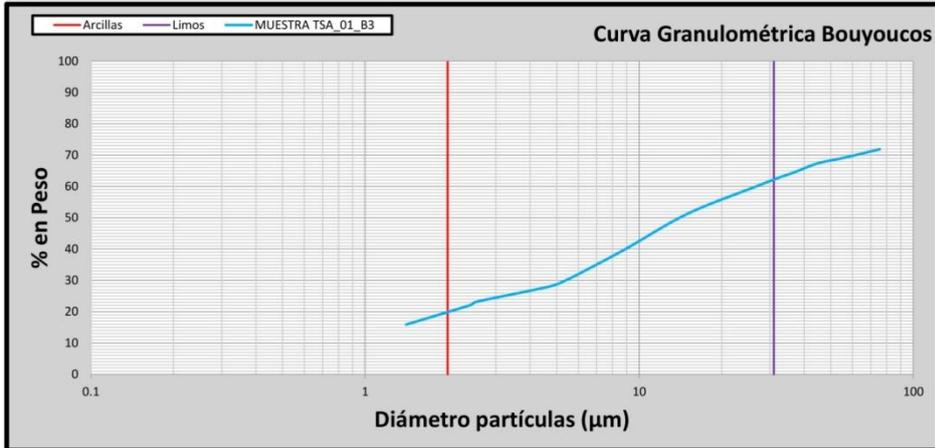
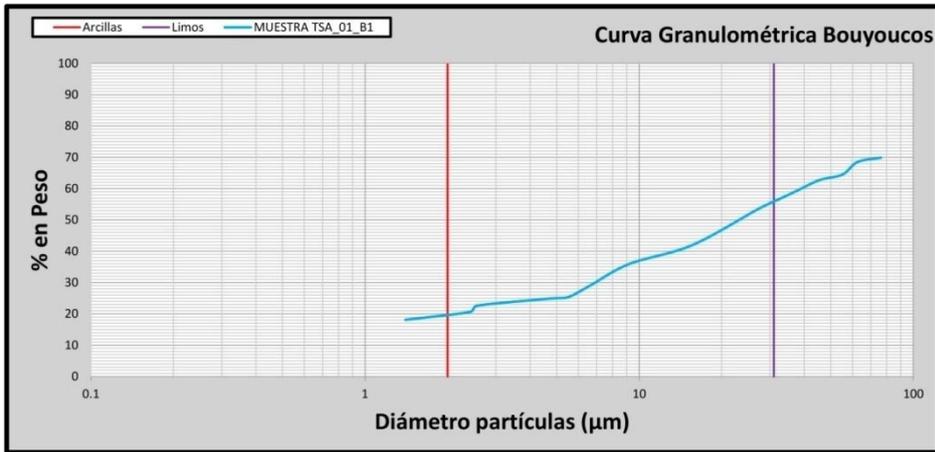
▪ TP_01



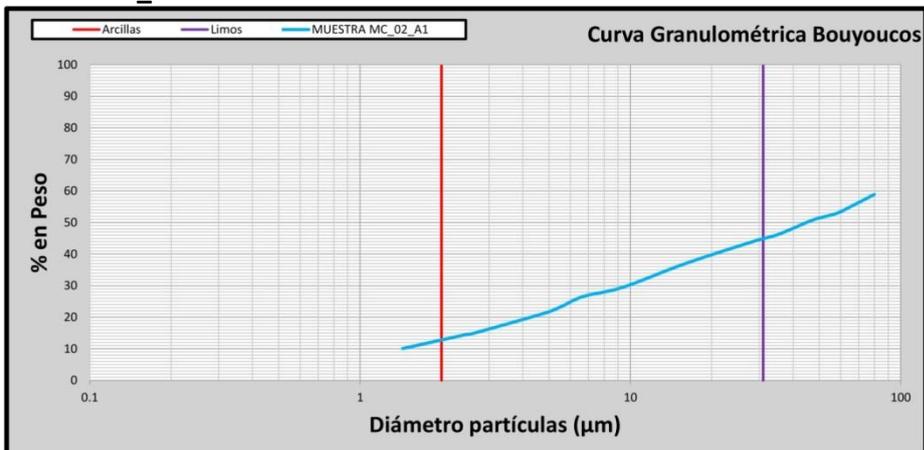


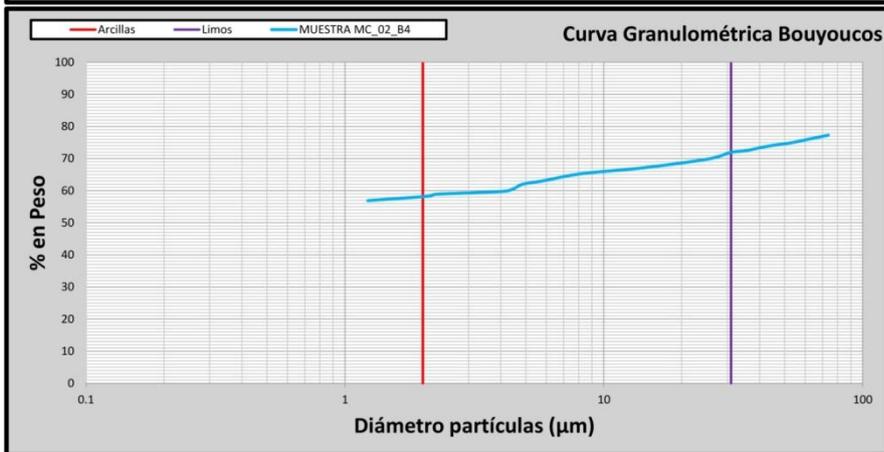
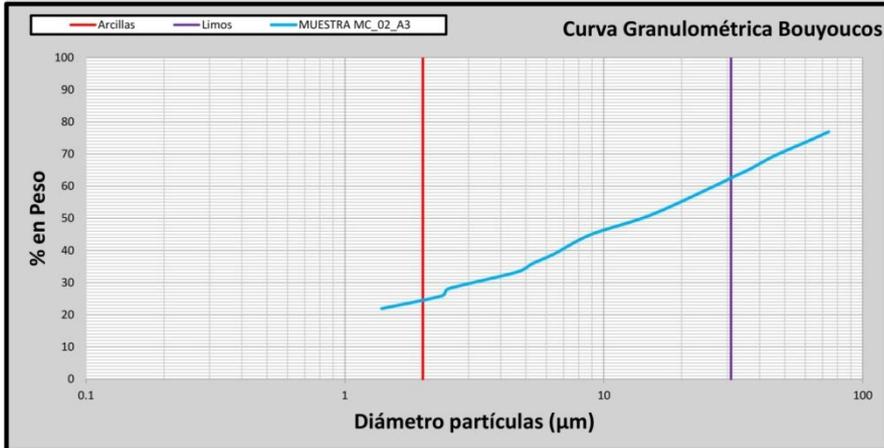
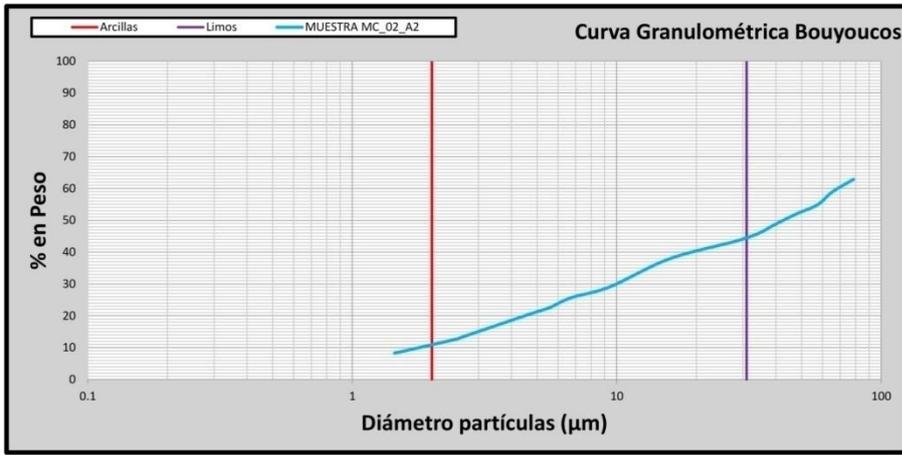
▪ **TSA_01**



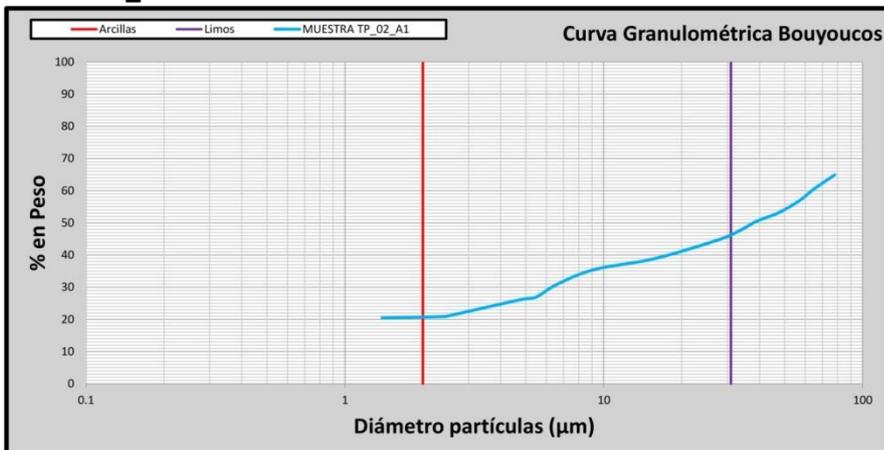


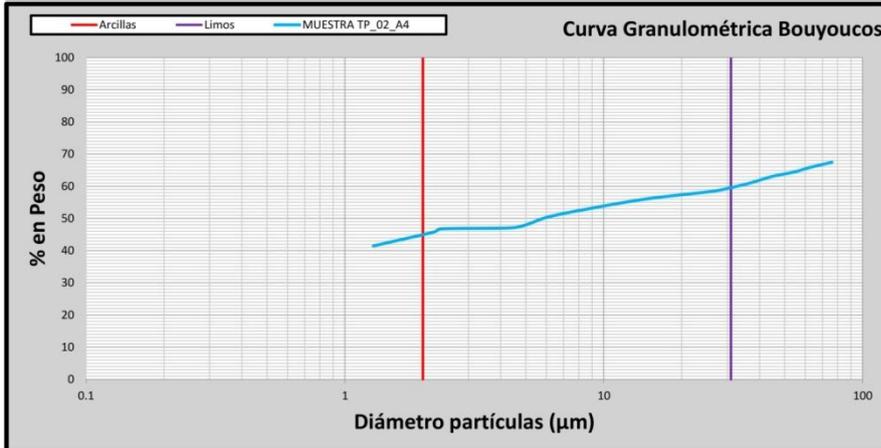
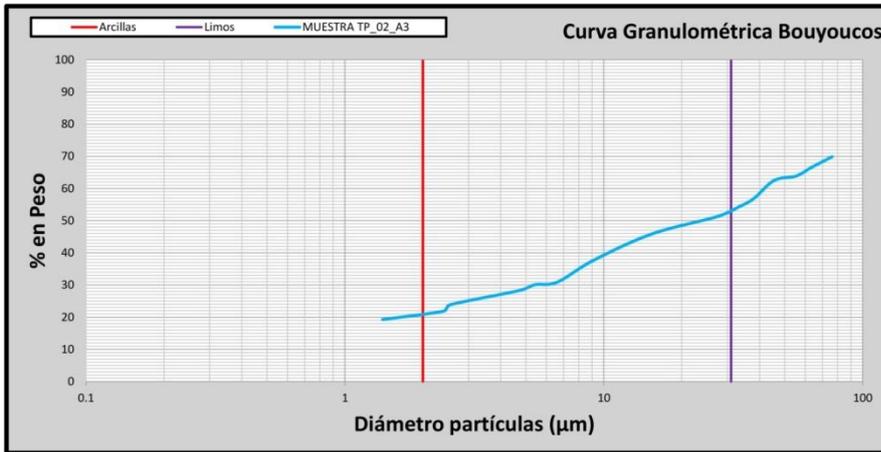
▪ MC_02



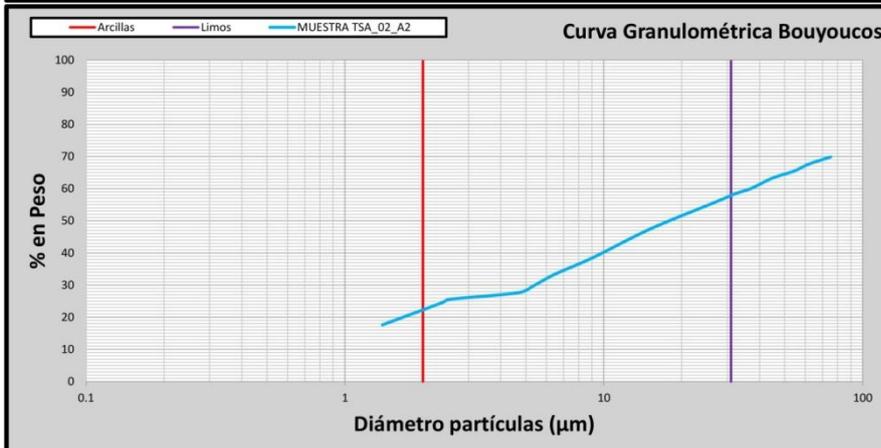
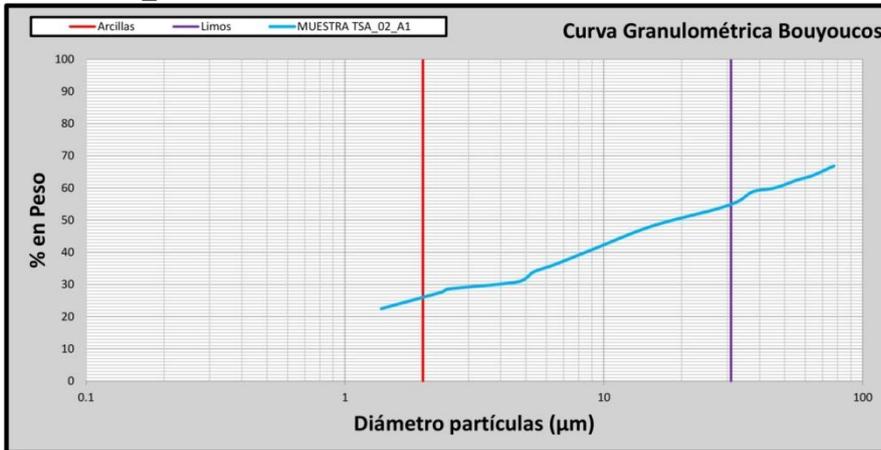


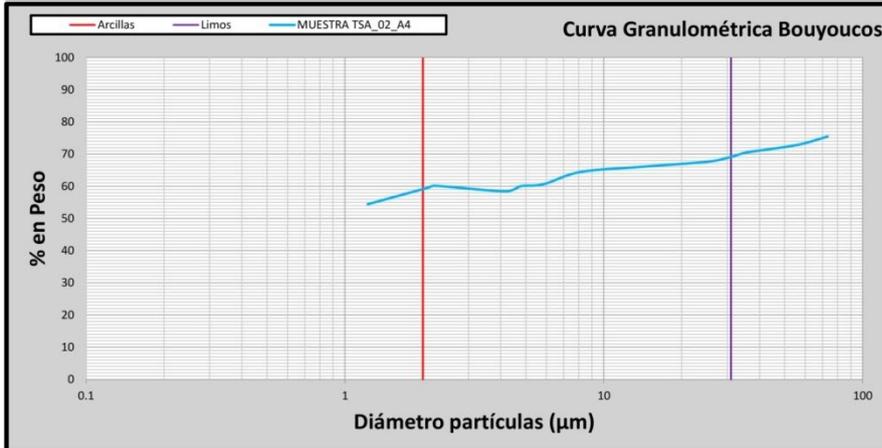
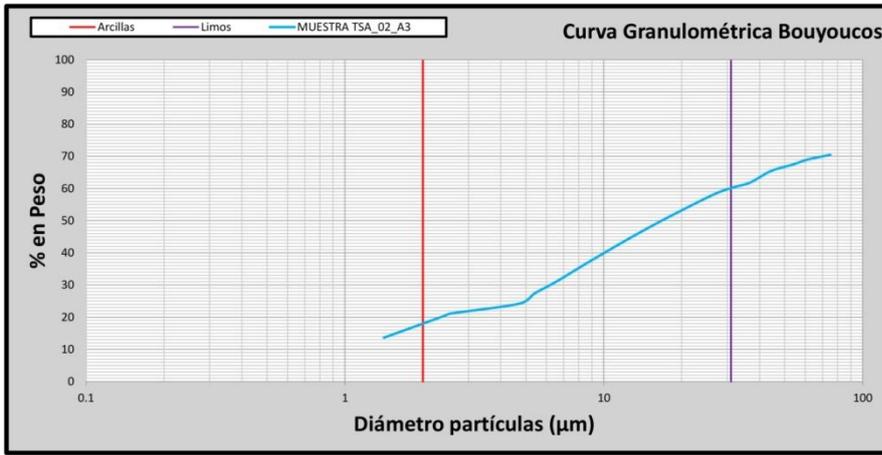
▪ **TP_02**



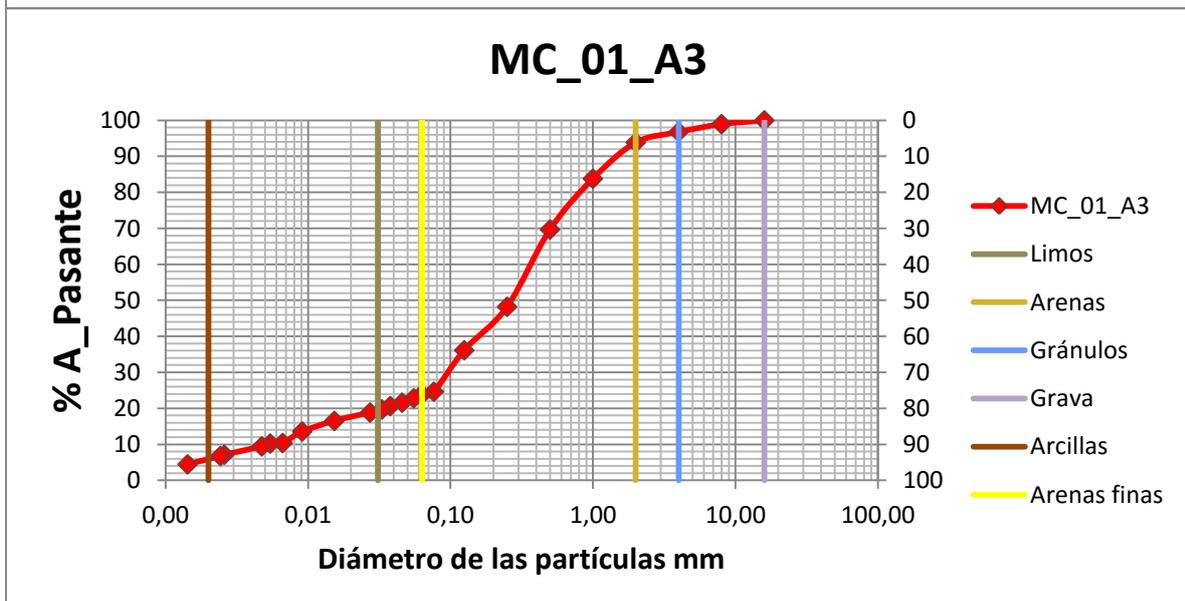
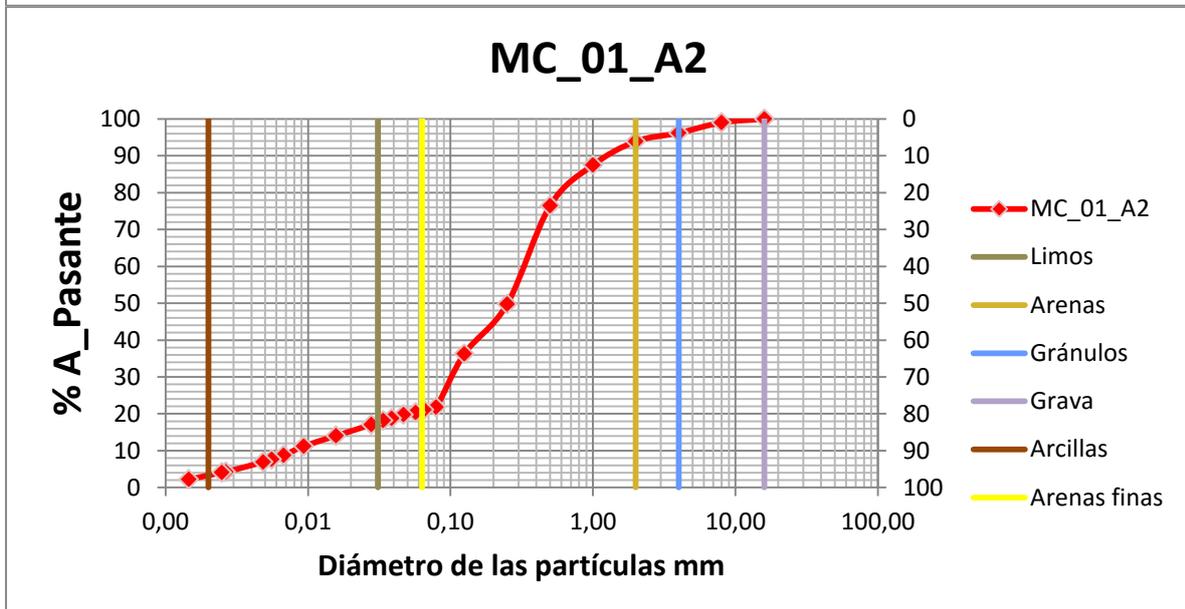
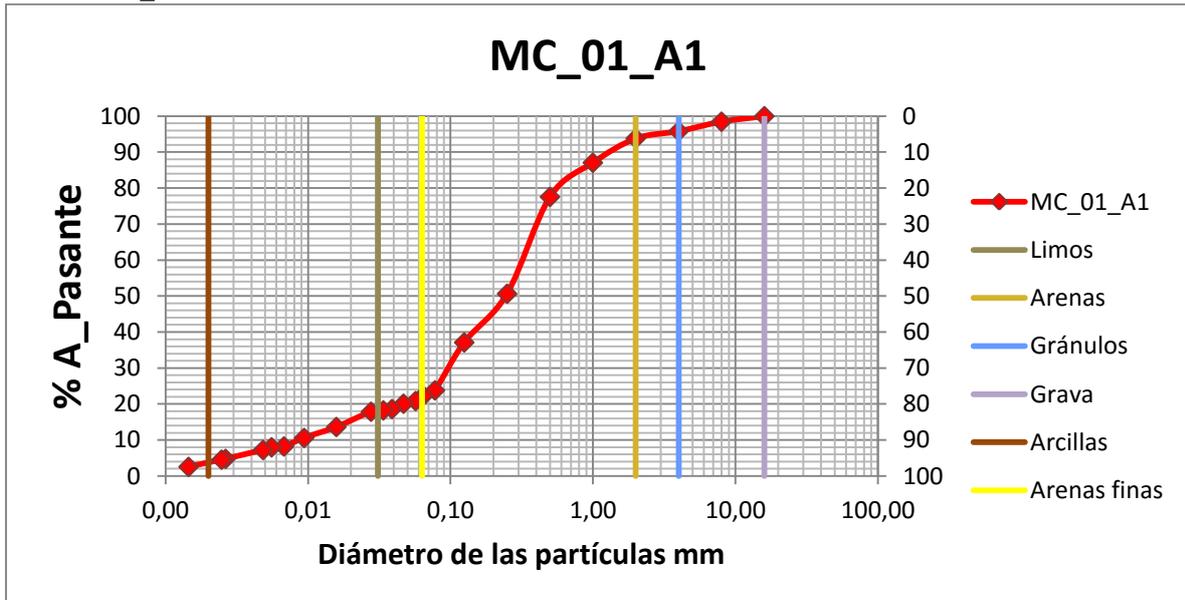


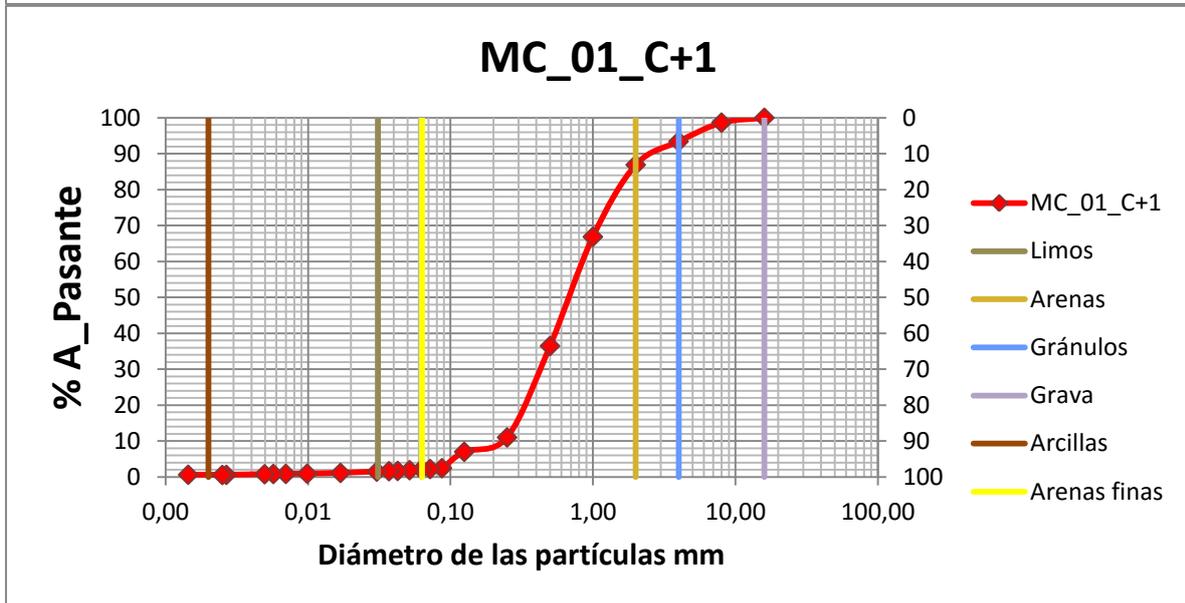
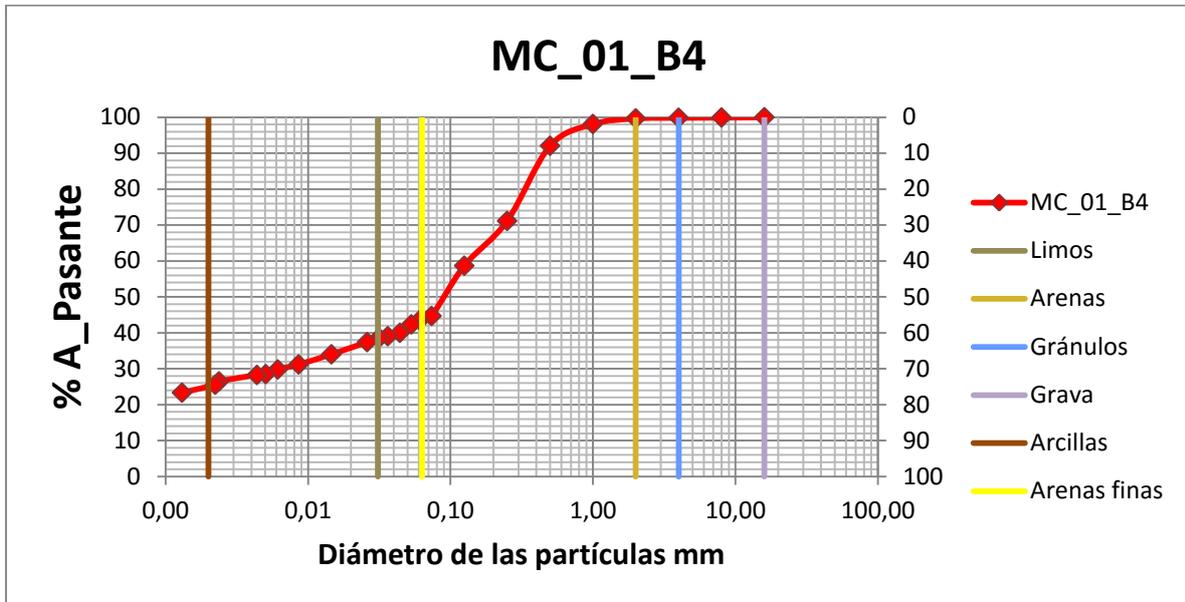
▪ **TSA_02**



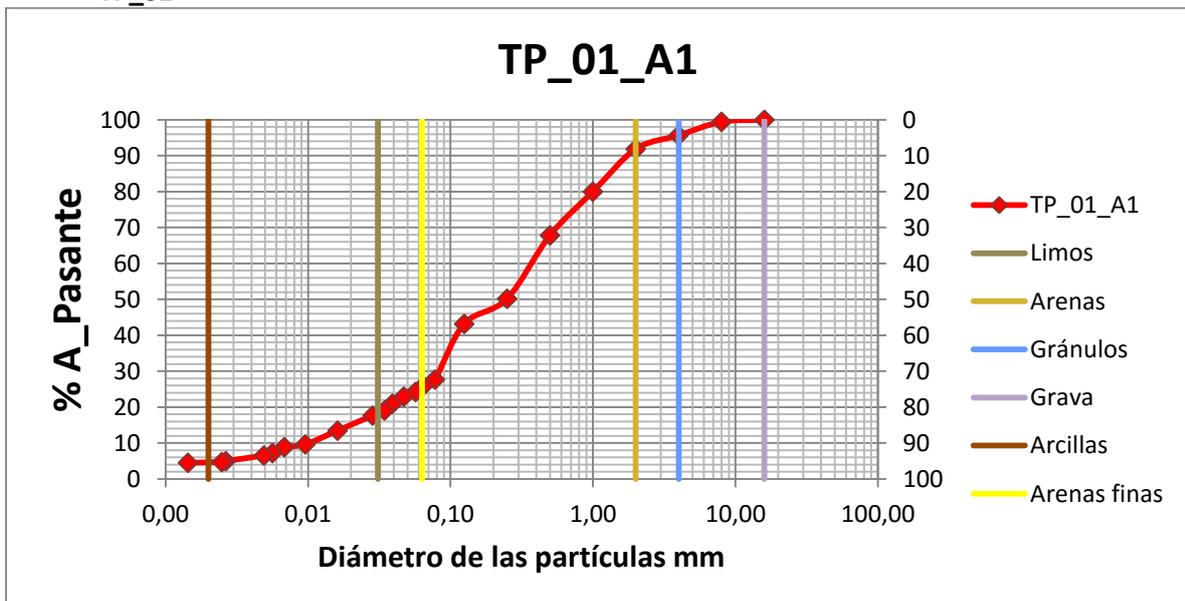


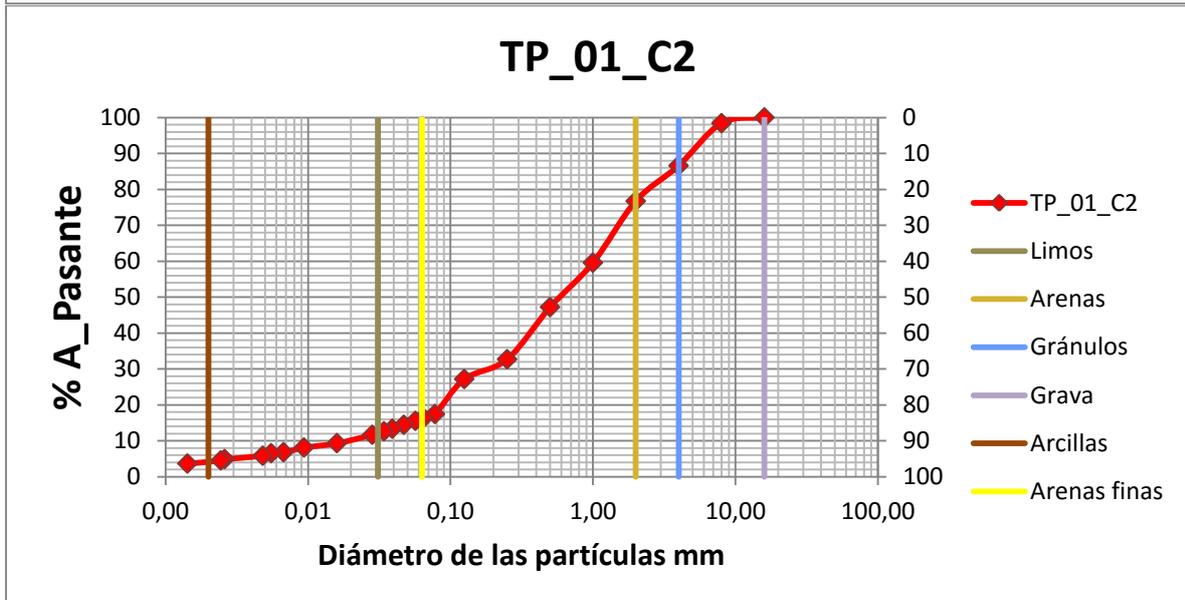
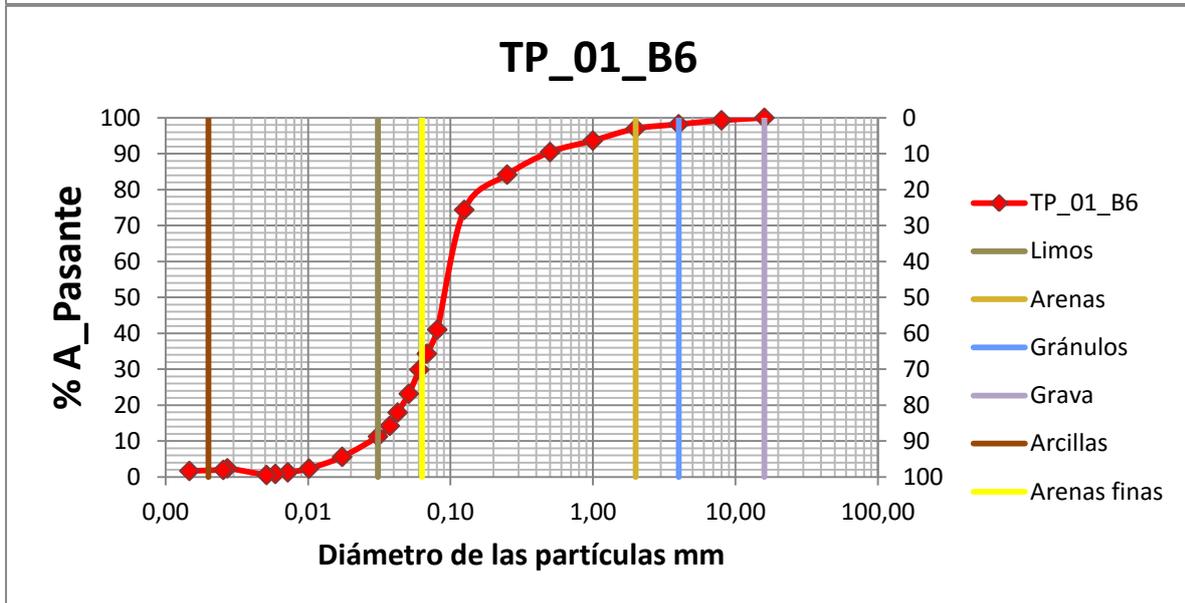
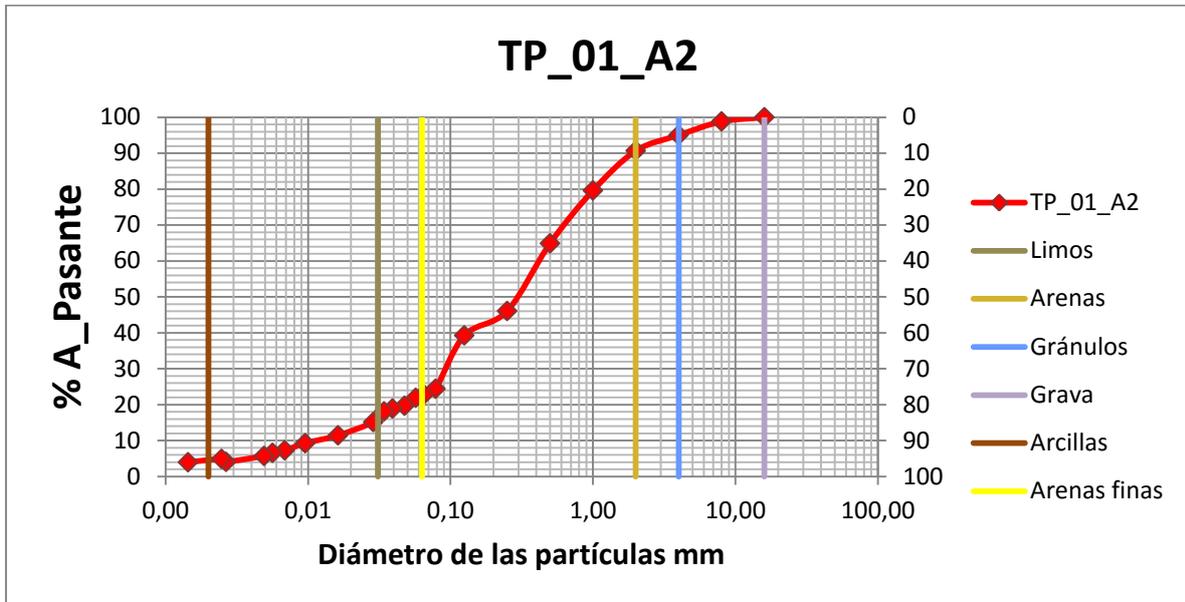
- Curvas Granulométricas totales. Finalmente se graficaron ambas curvas juntas
 - MC_01

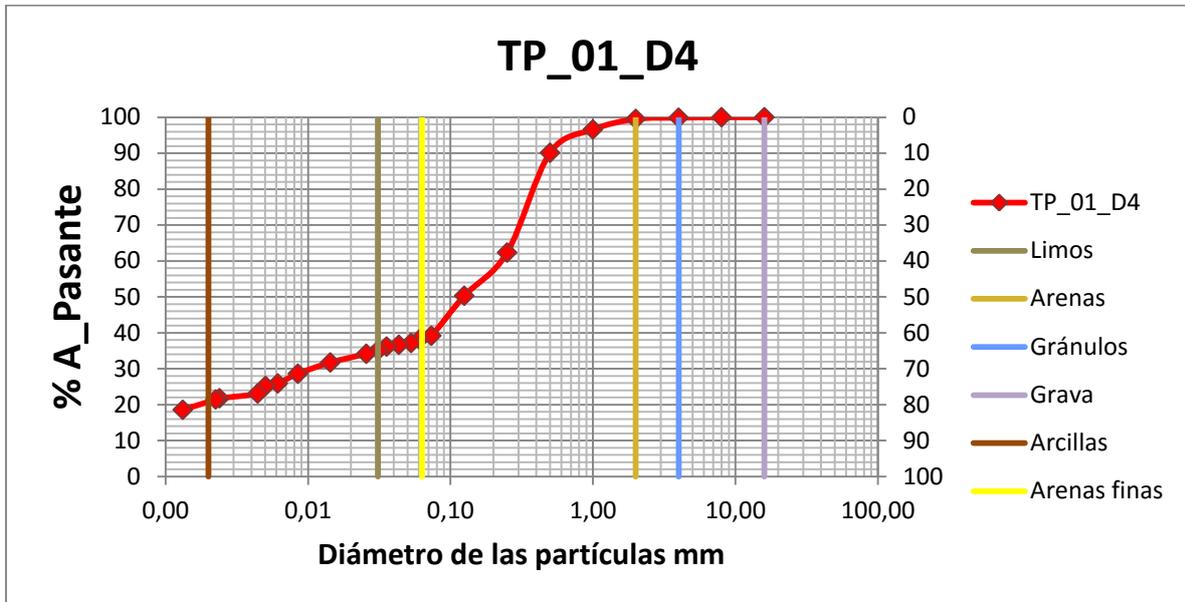




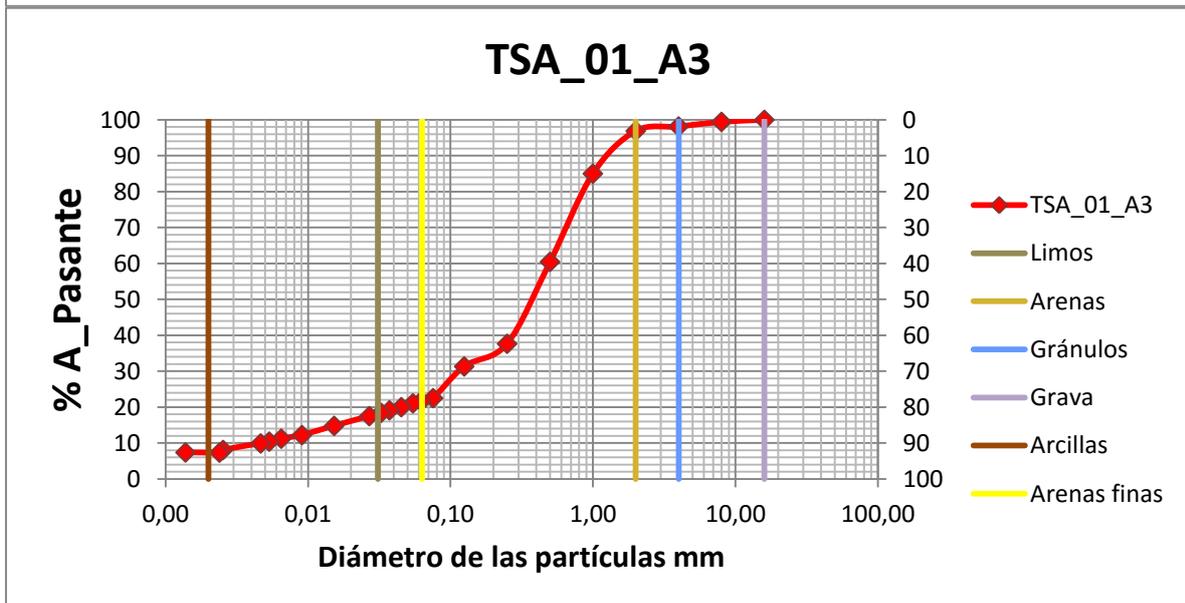
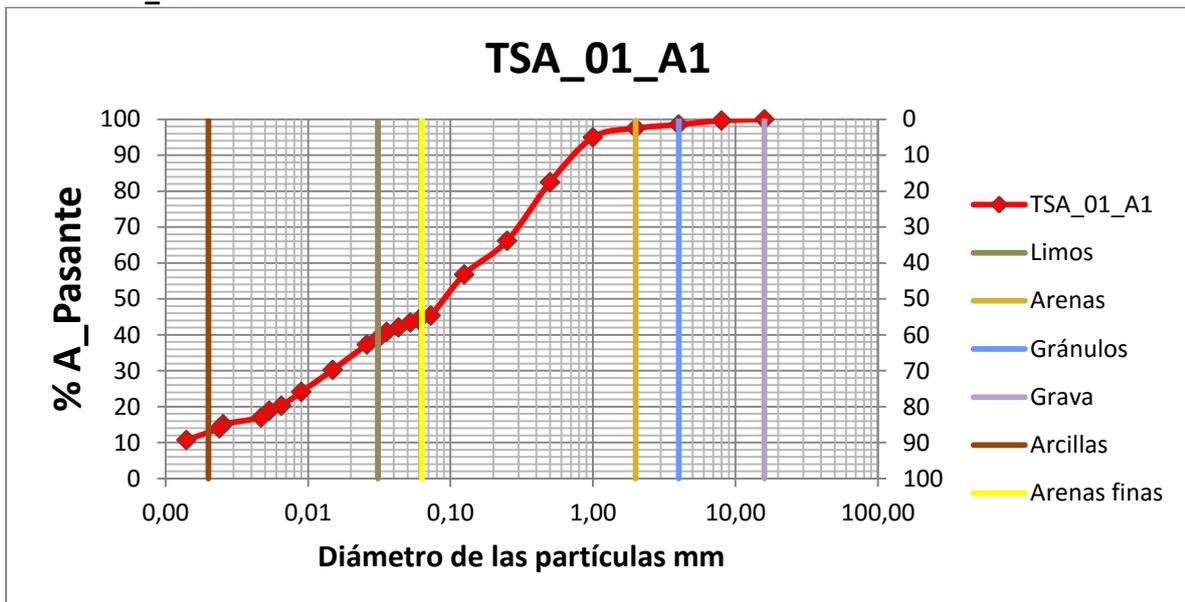
▪ TP_01

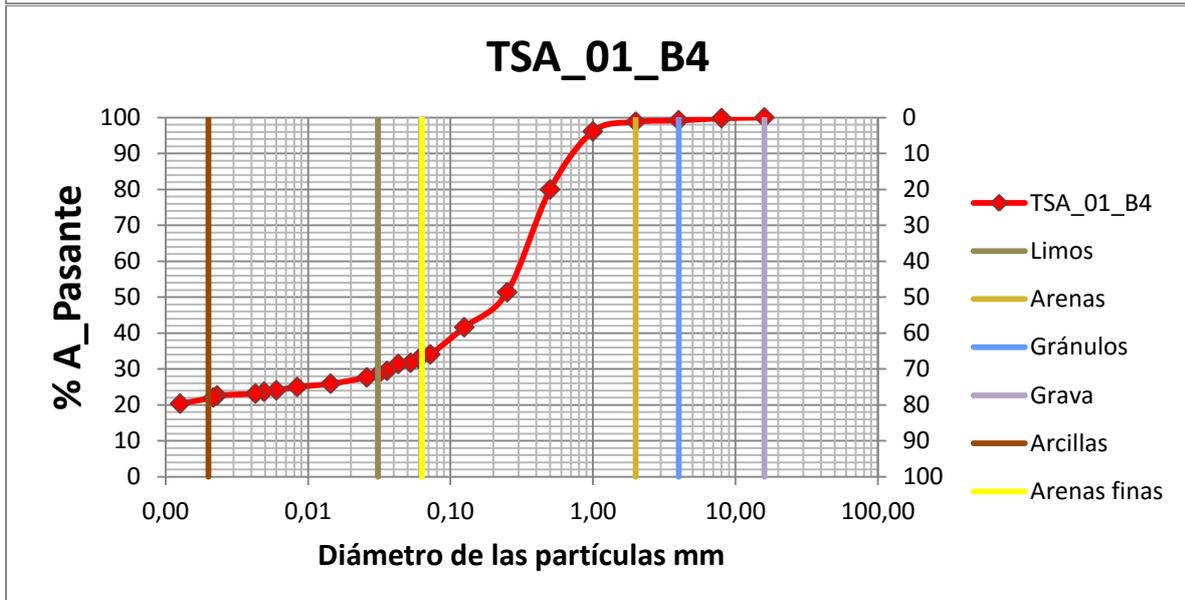
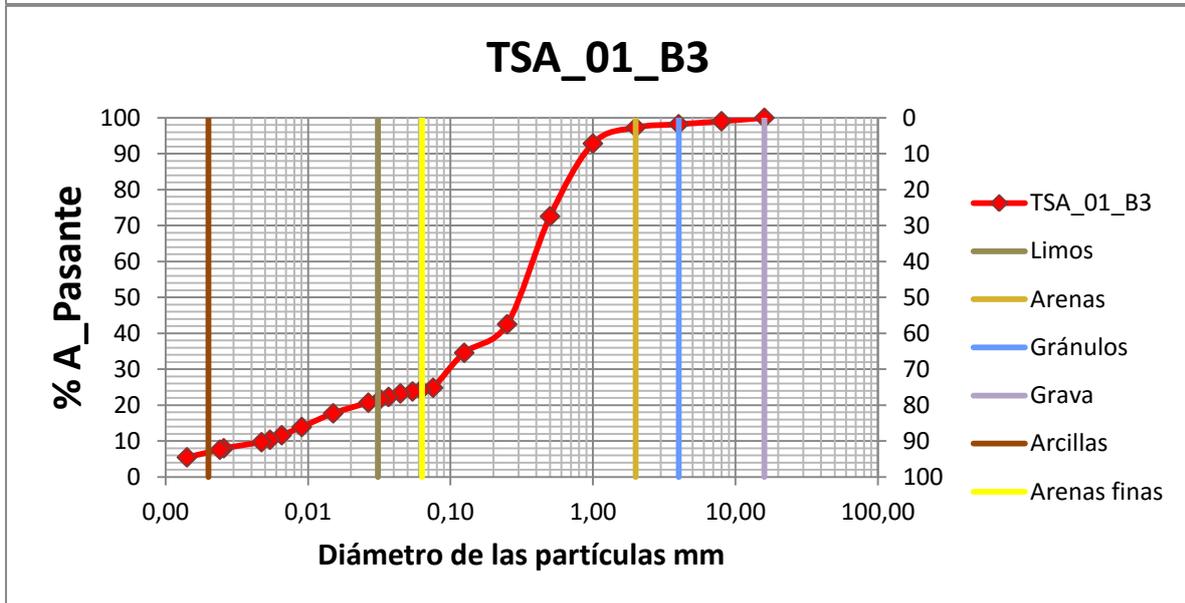
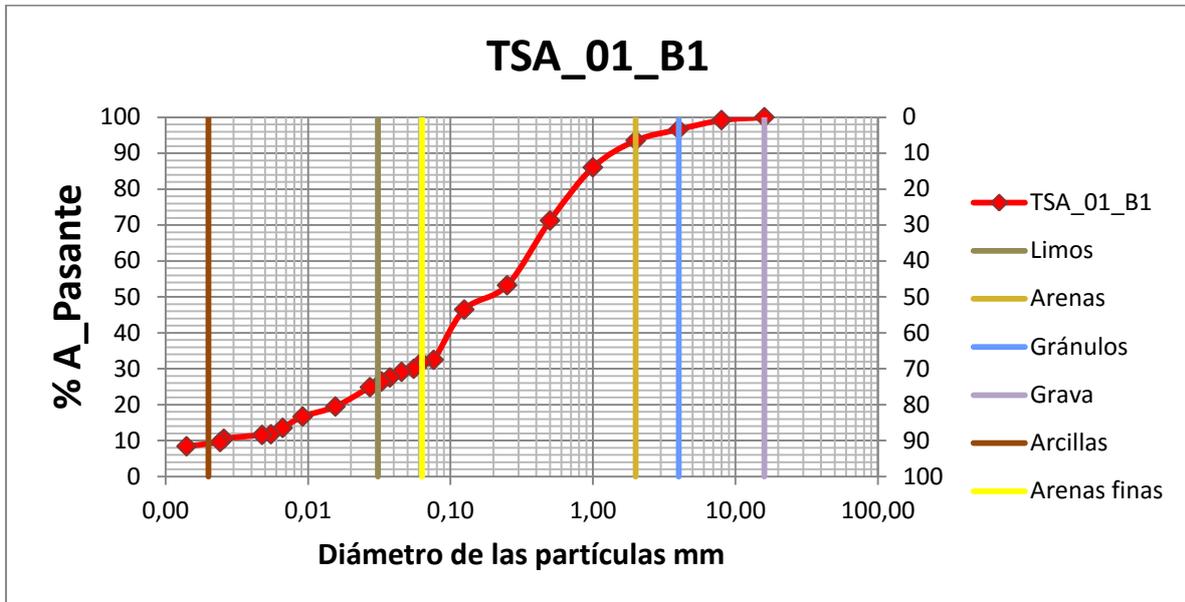






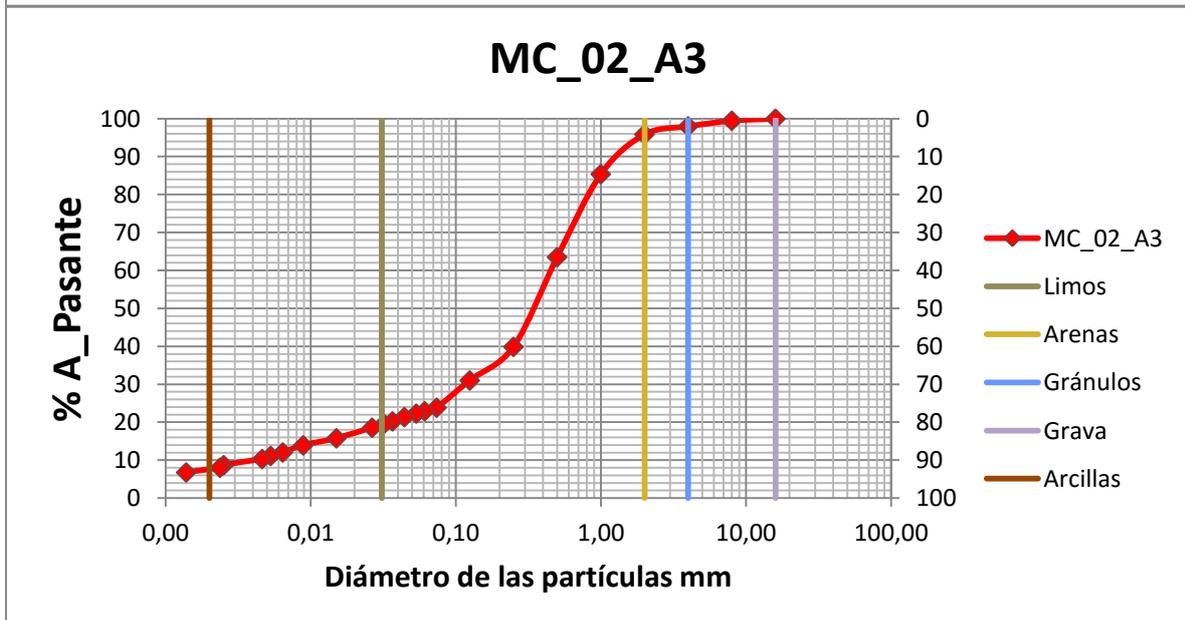
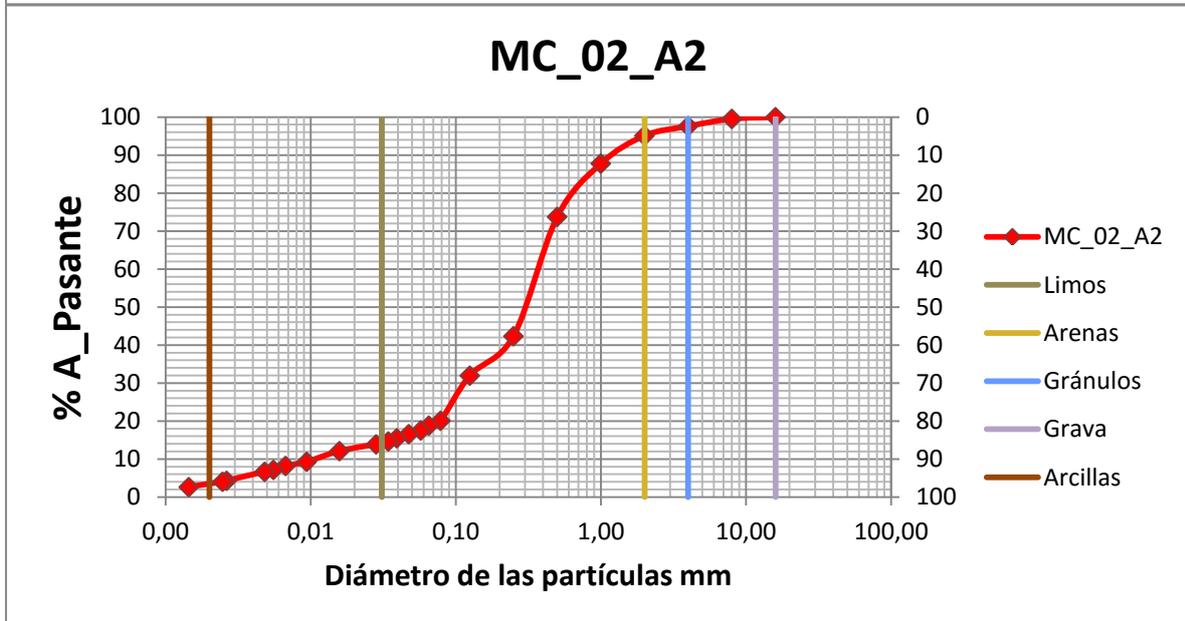
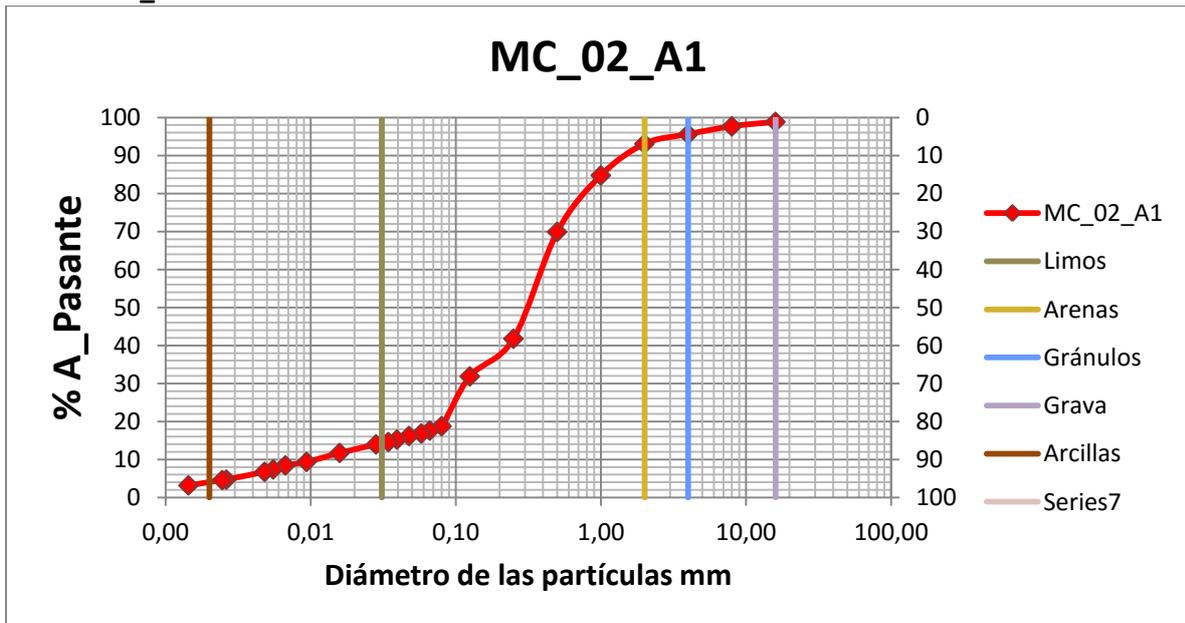
▪ TSA_01

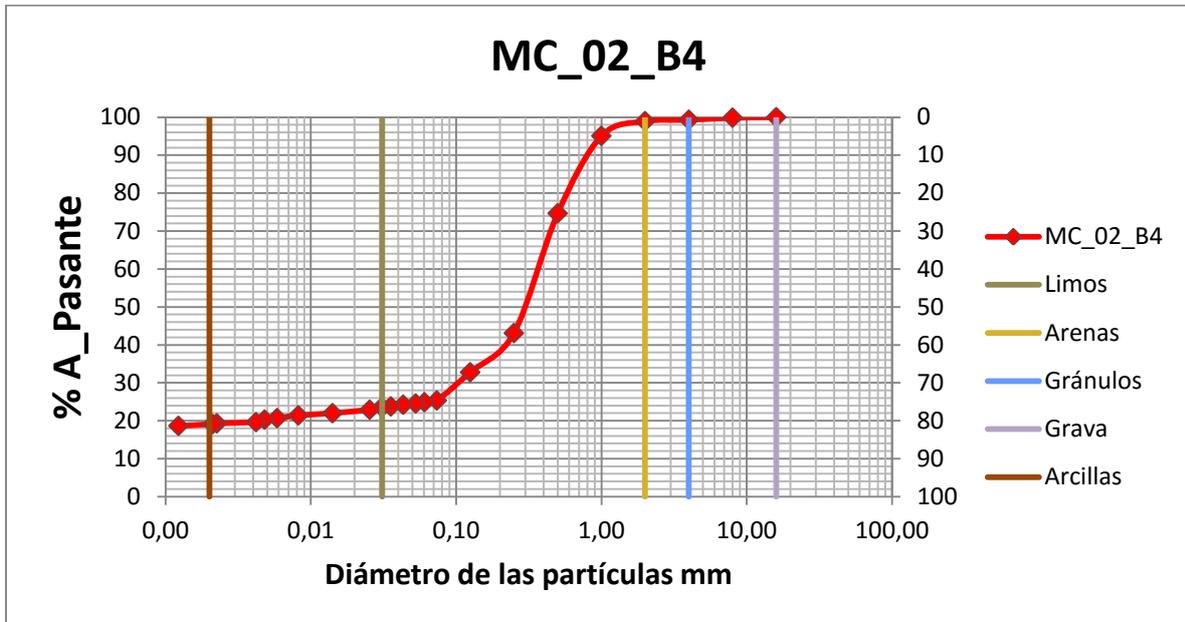




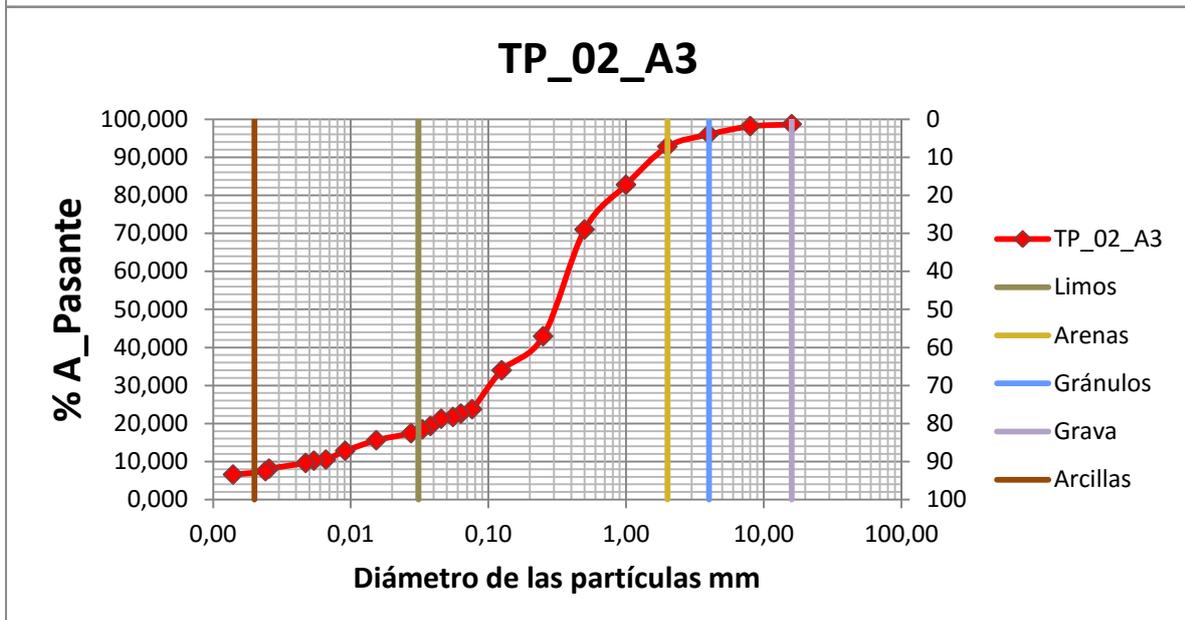
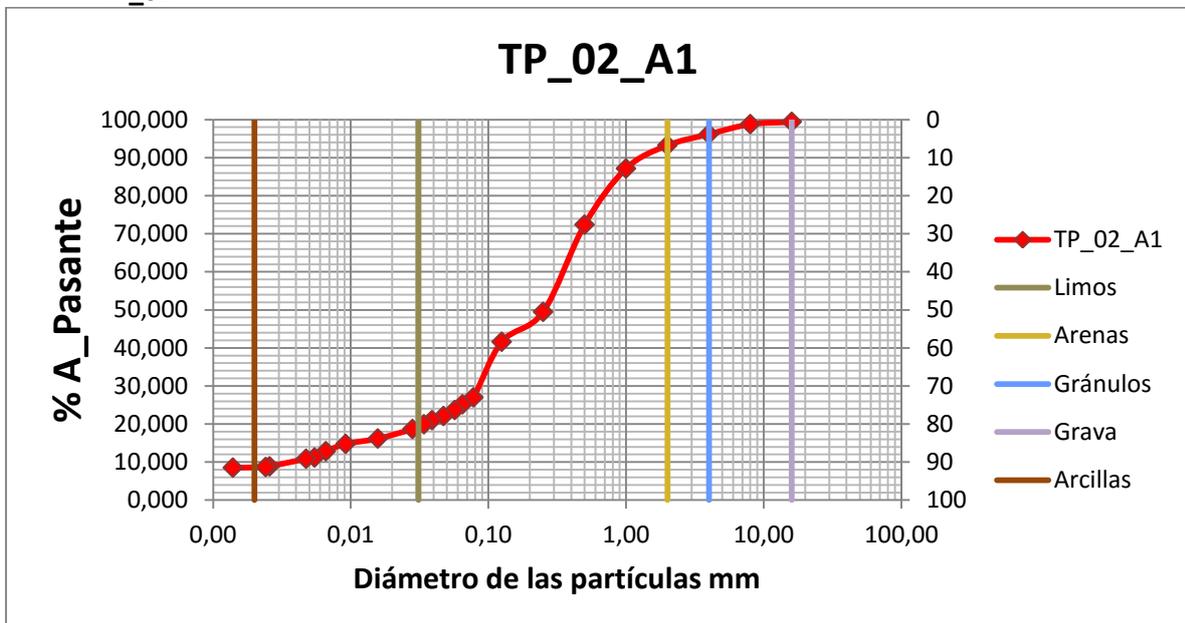
LOTE 02

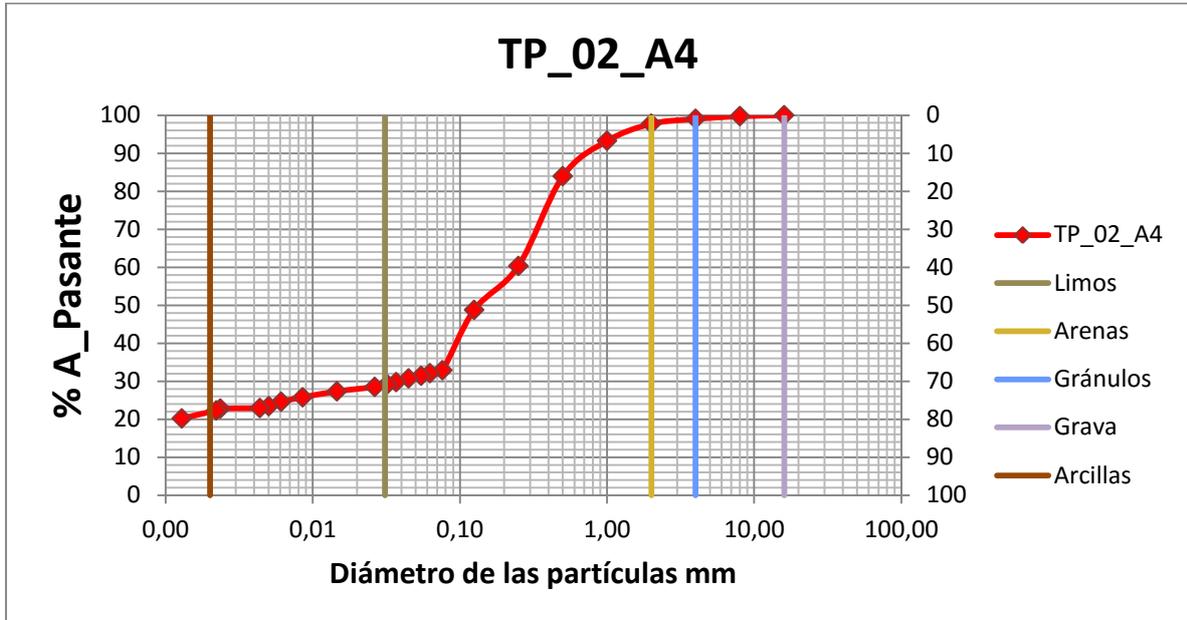
▪ MC_02



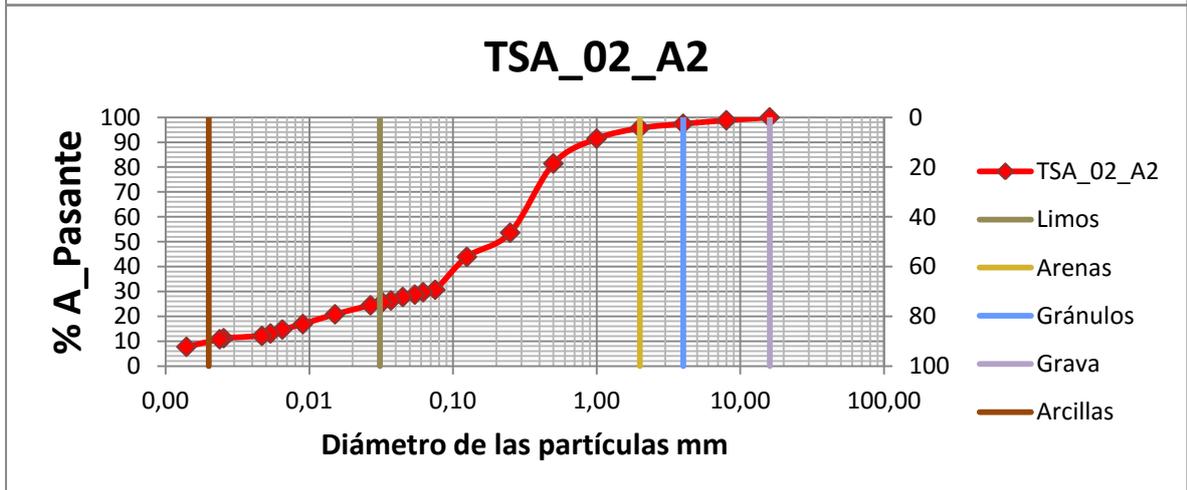
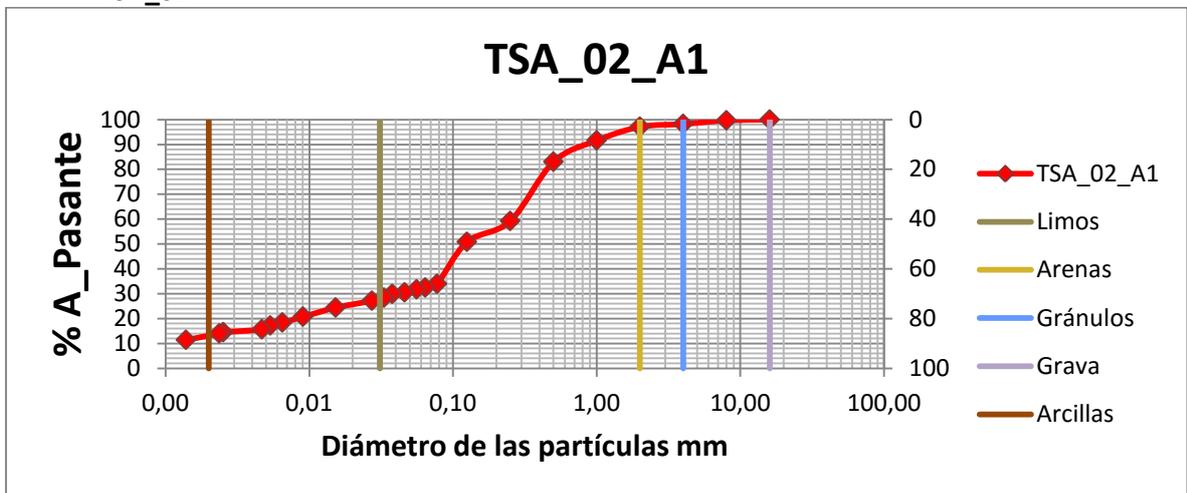


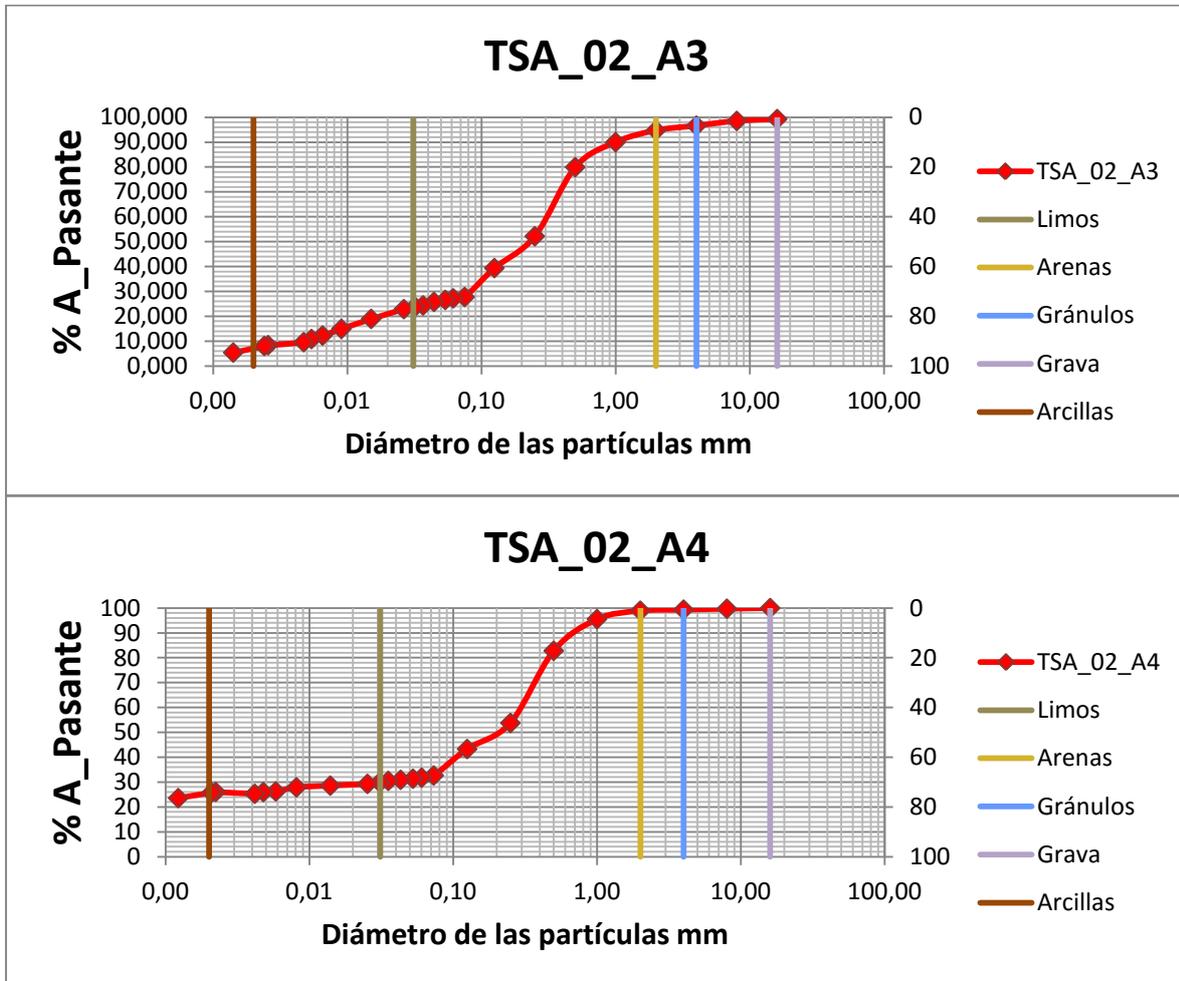
▪ TP_02





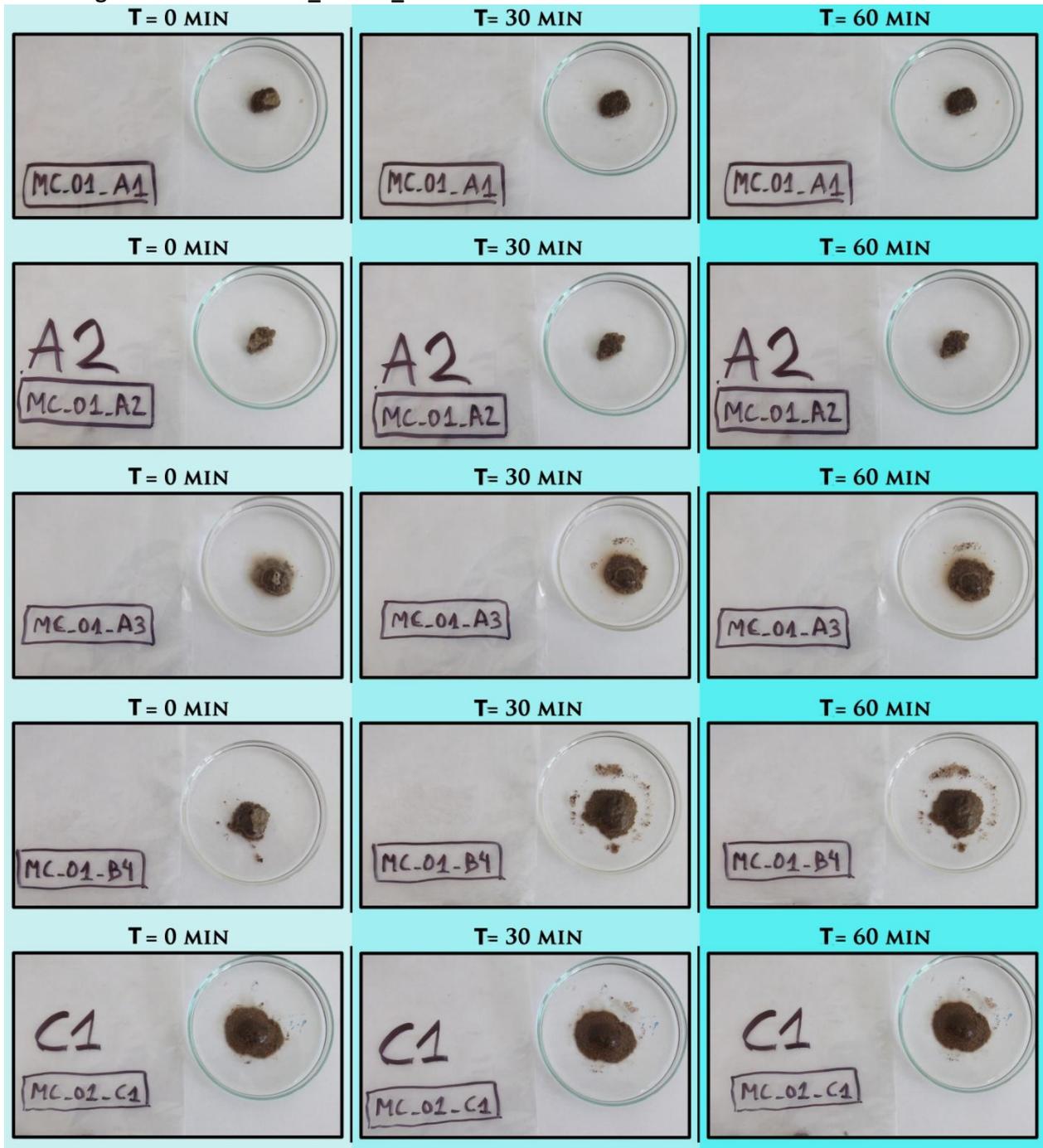
▪ TSA_02



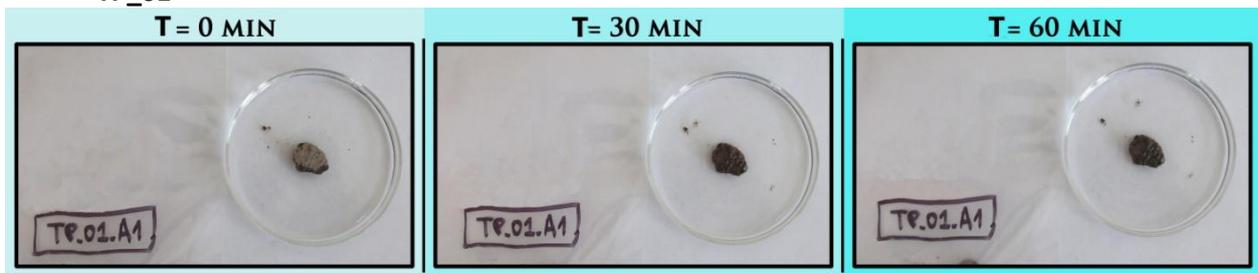


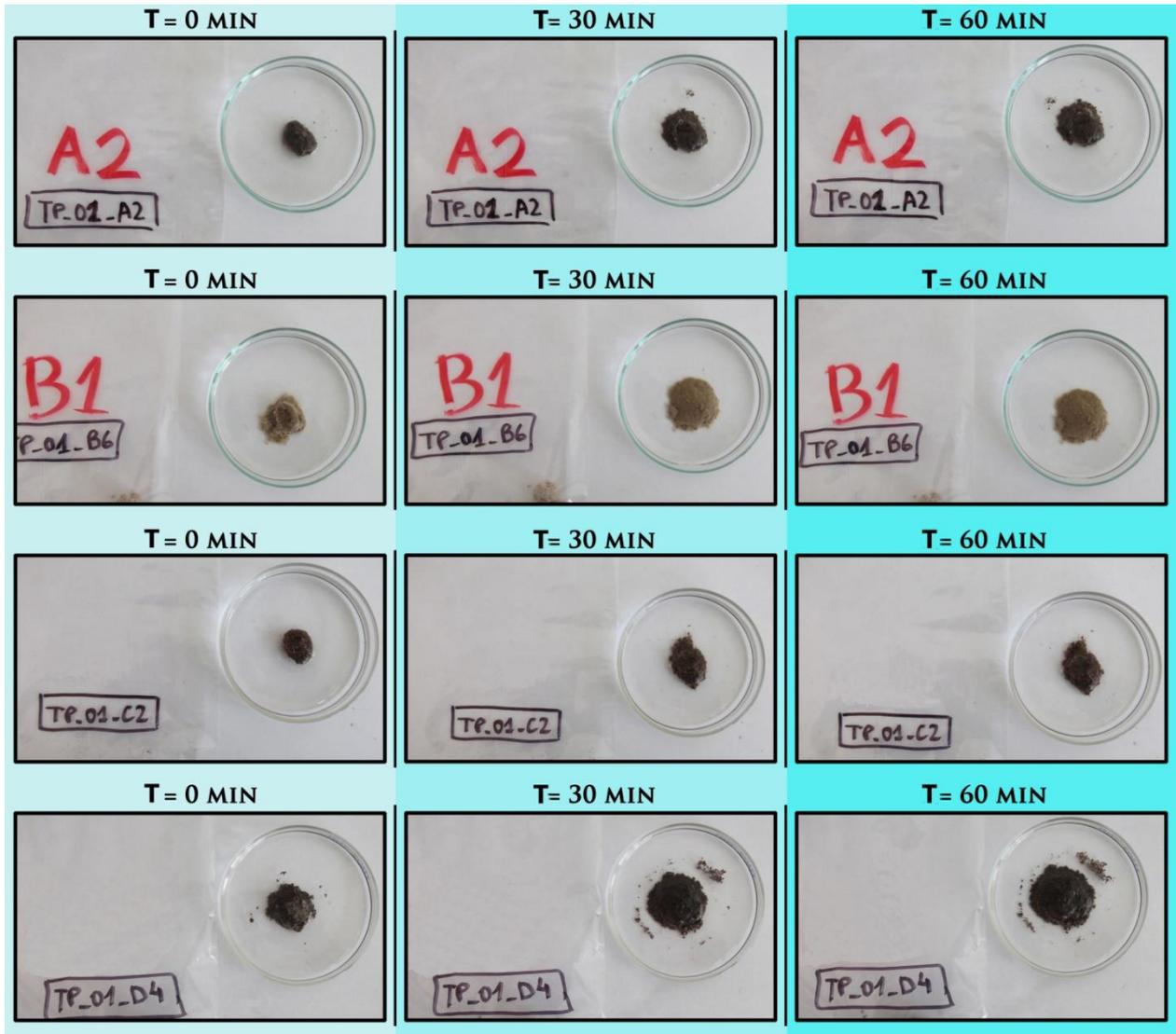
II.1.3. TEST DE DISPERSIVIDAD. Se realizaron dos pruebas 1 con agua desionizada y otra con NaOH 1 normal

- Agua desionizada Lote_01: MC_01

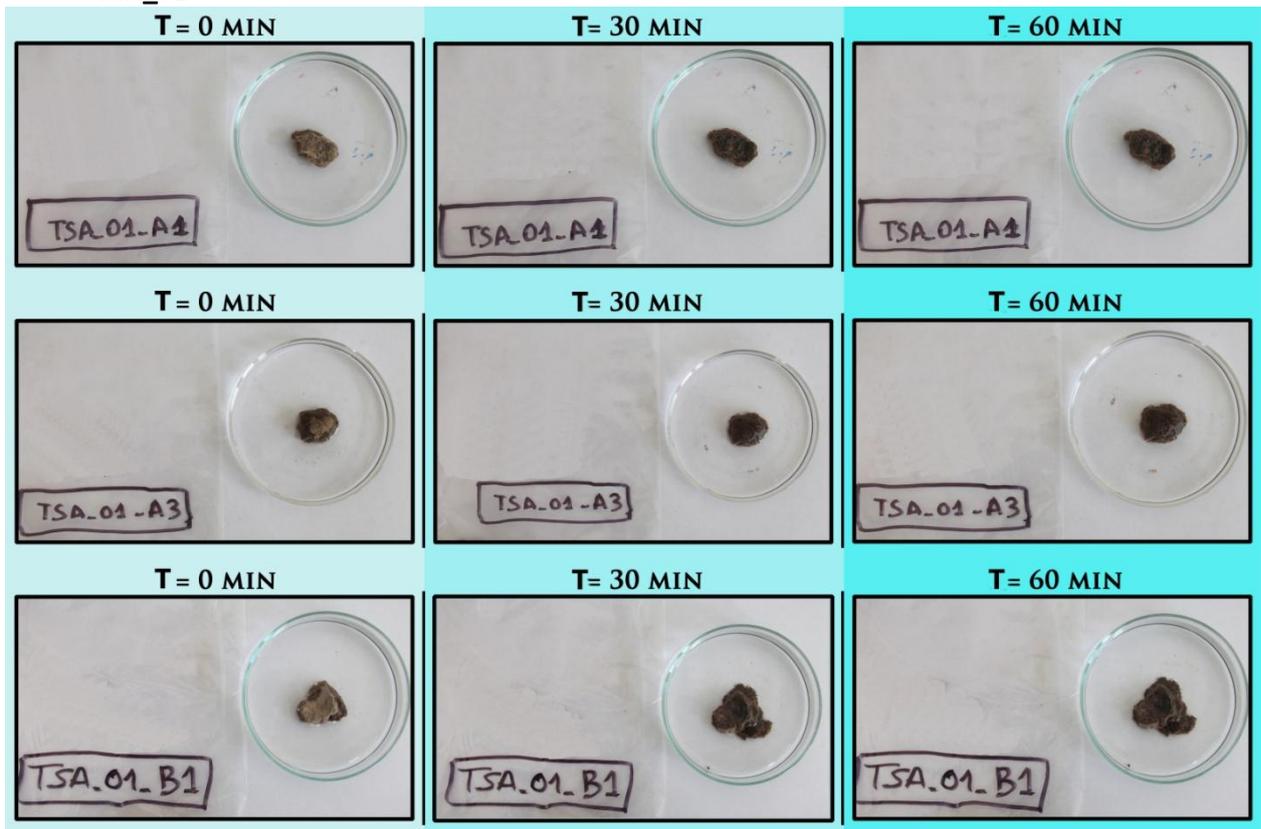


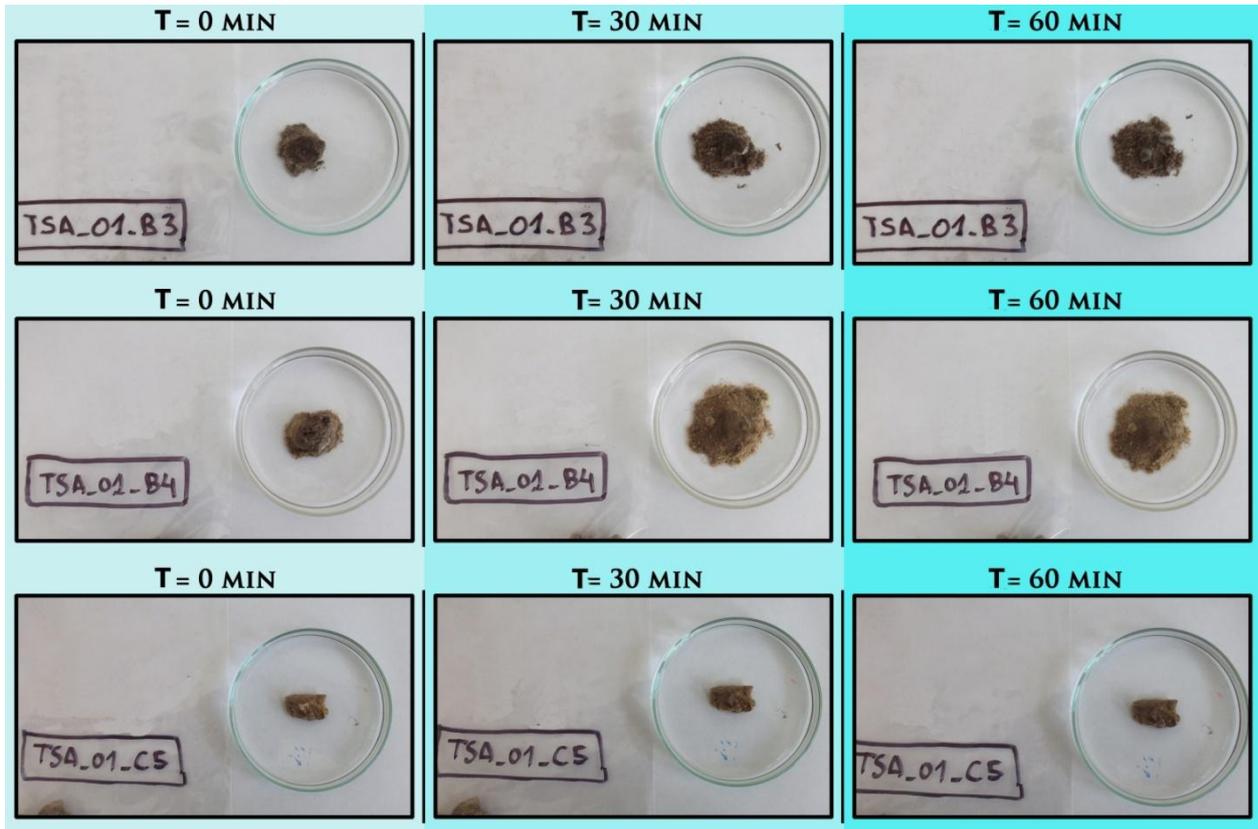
- TP_01



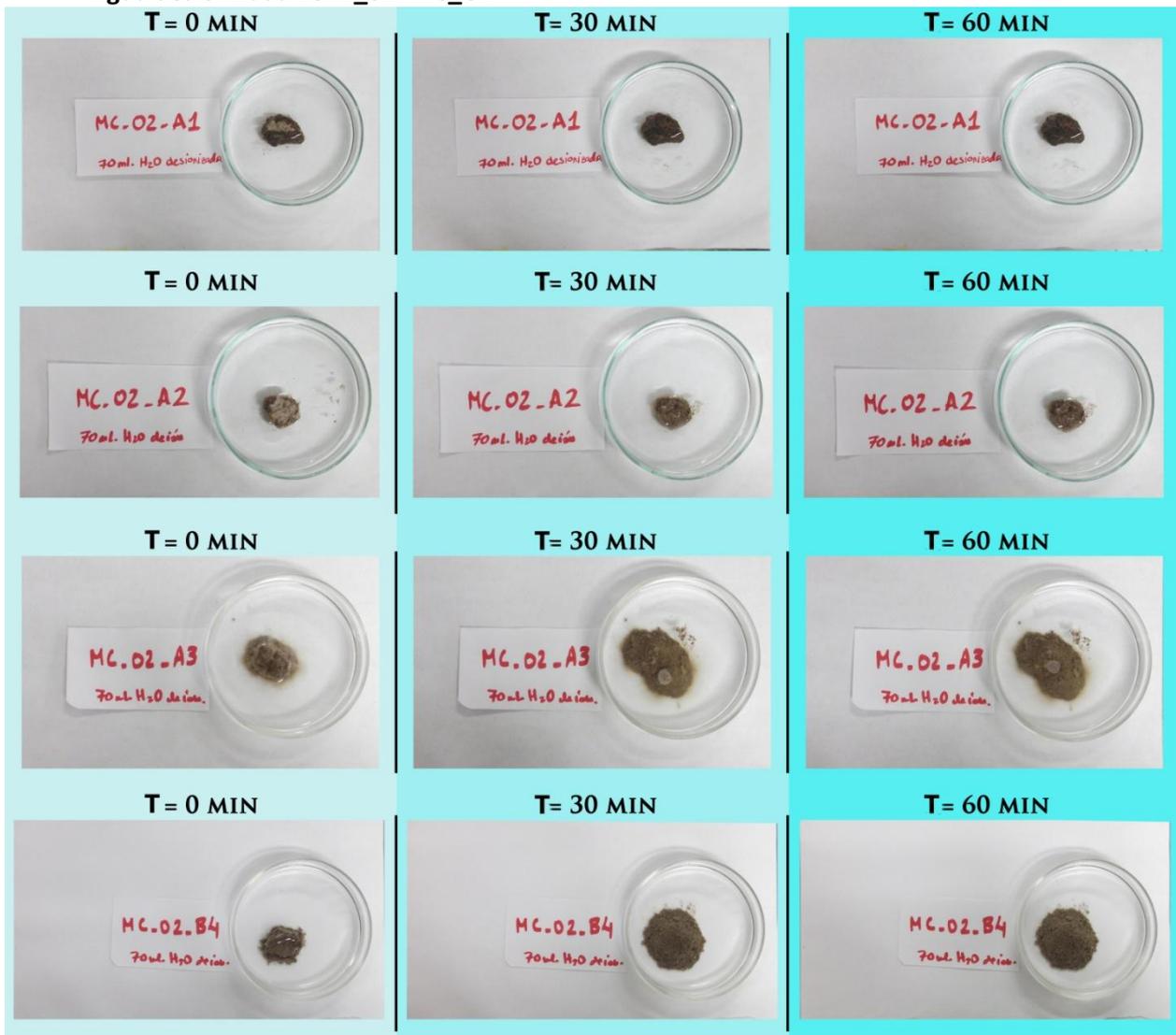


▪ TSA_01

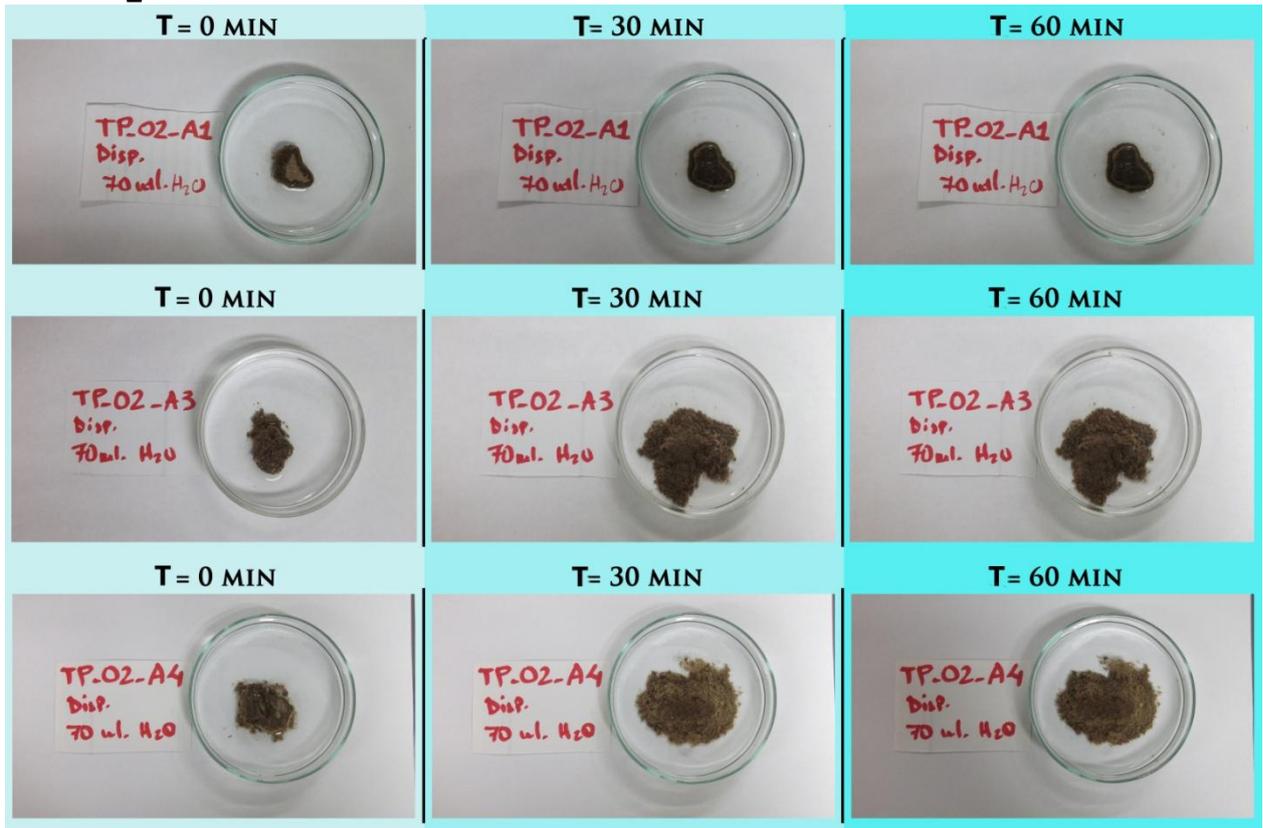




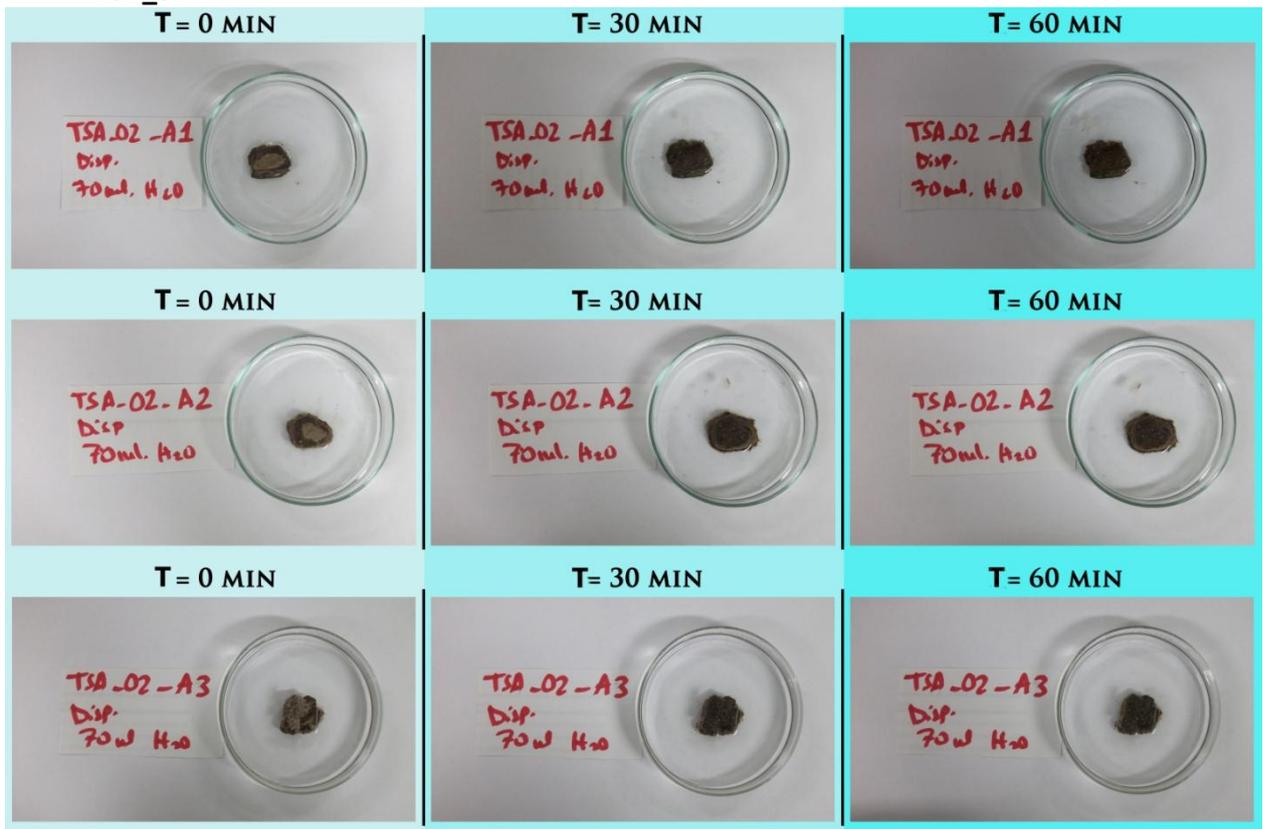
▪ Agua desionizada LOTE_02: MC_02

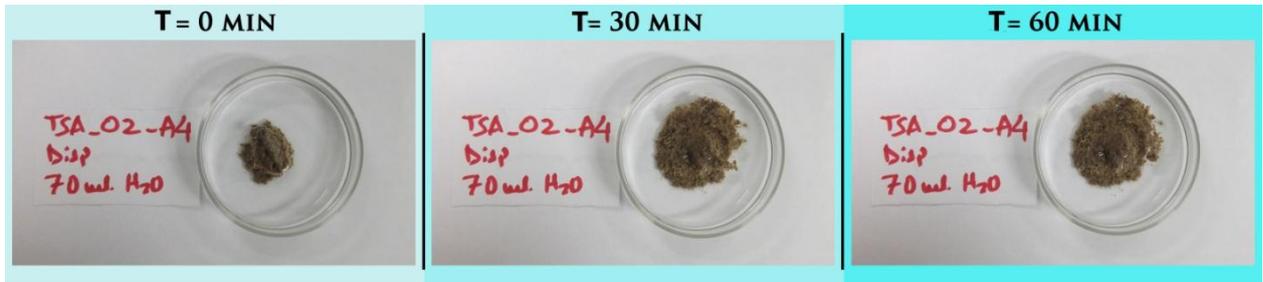


▪ TP_02

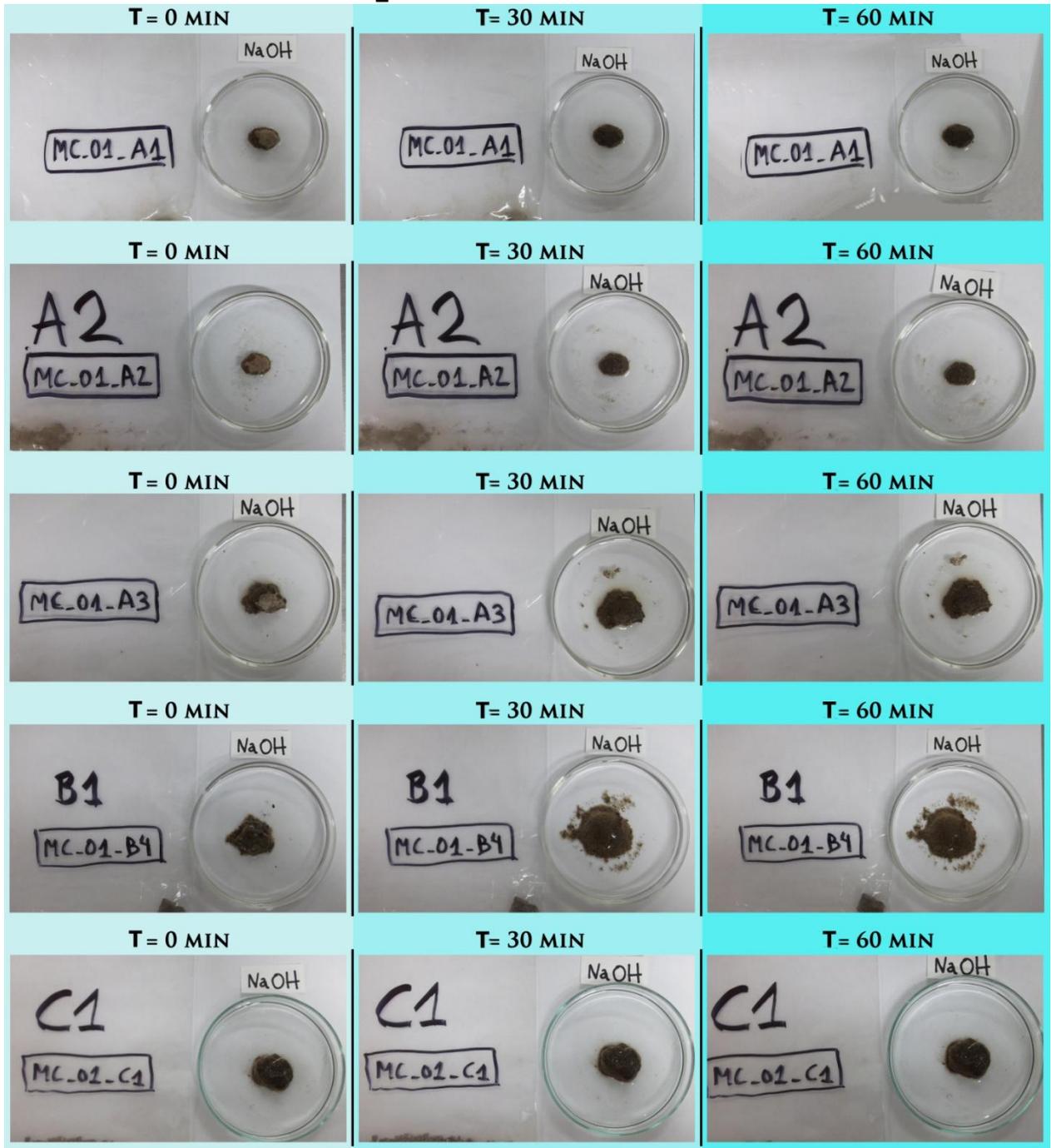


▪ TSA_02





▪ Solución NaOH 1 normal: MC_01

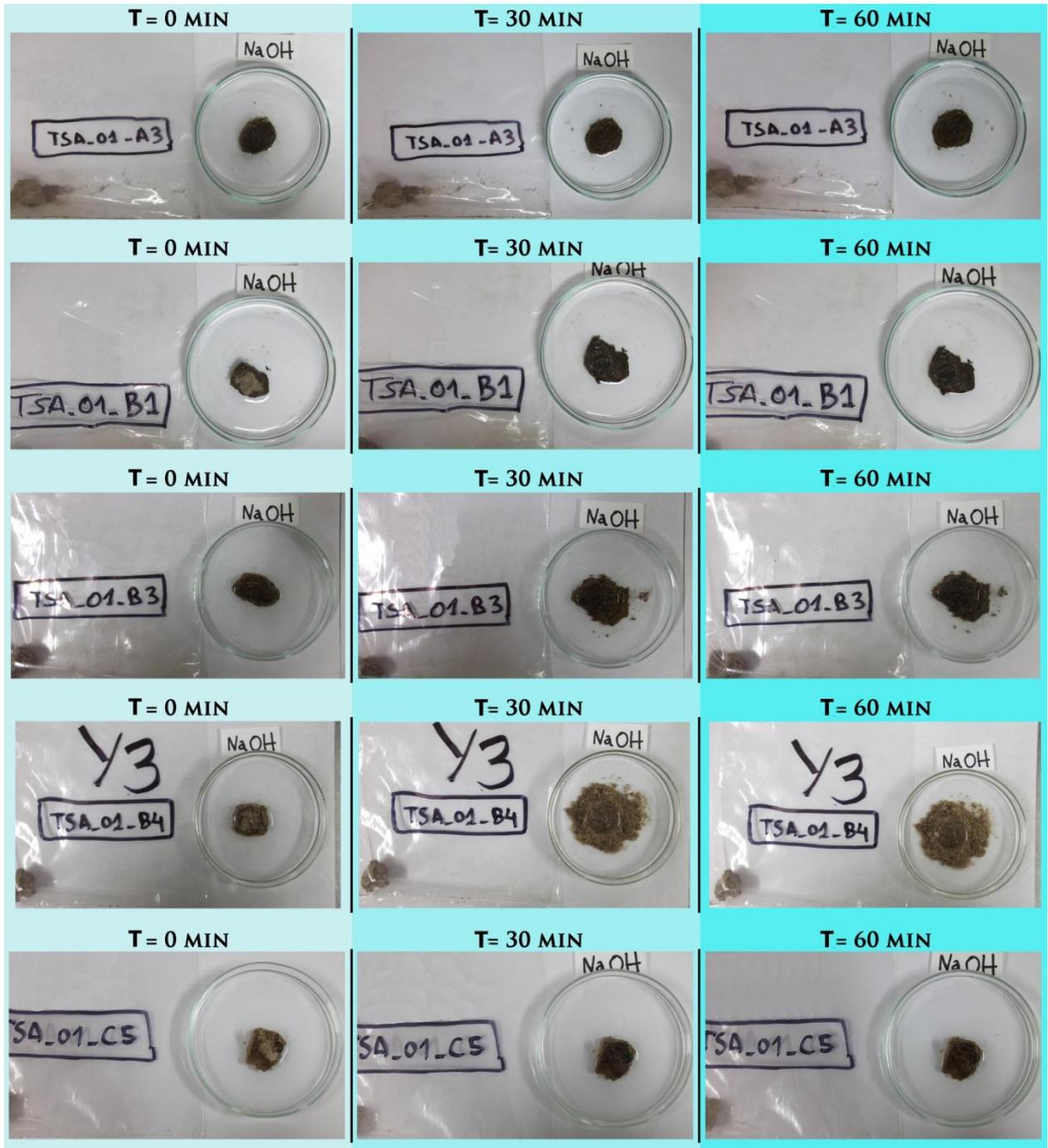


• TP_01

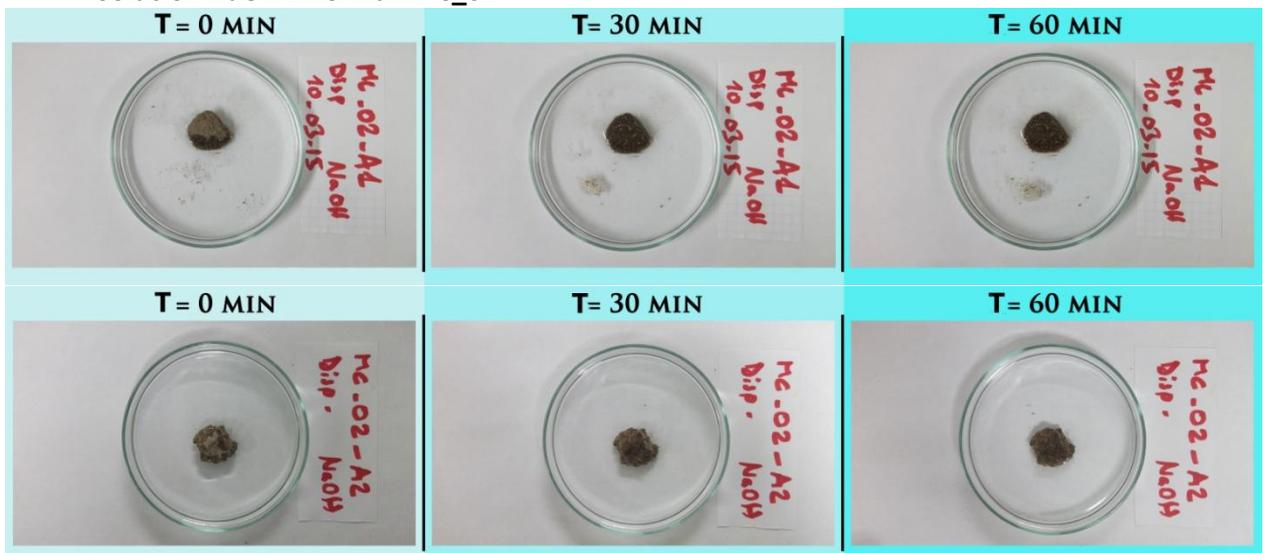


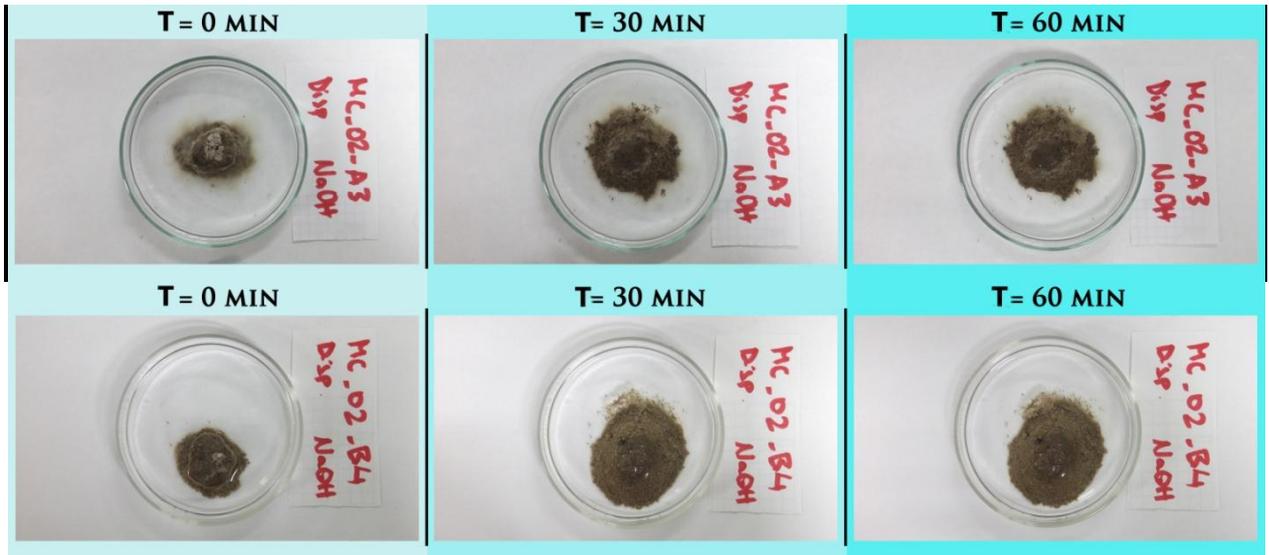
• TSA_01



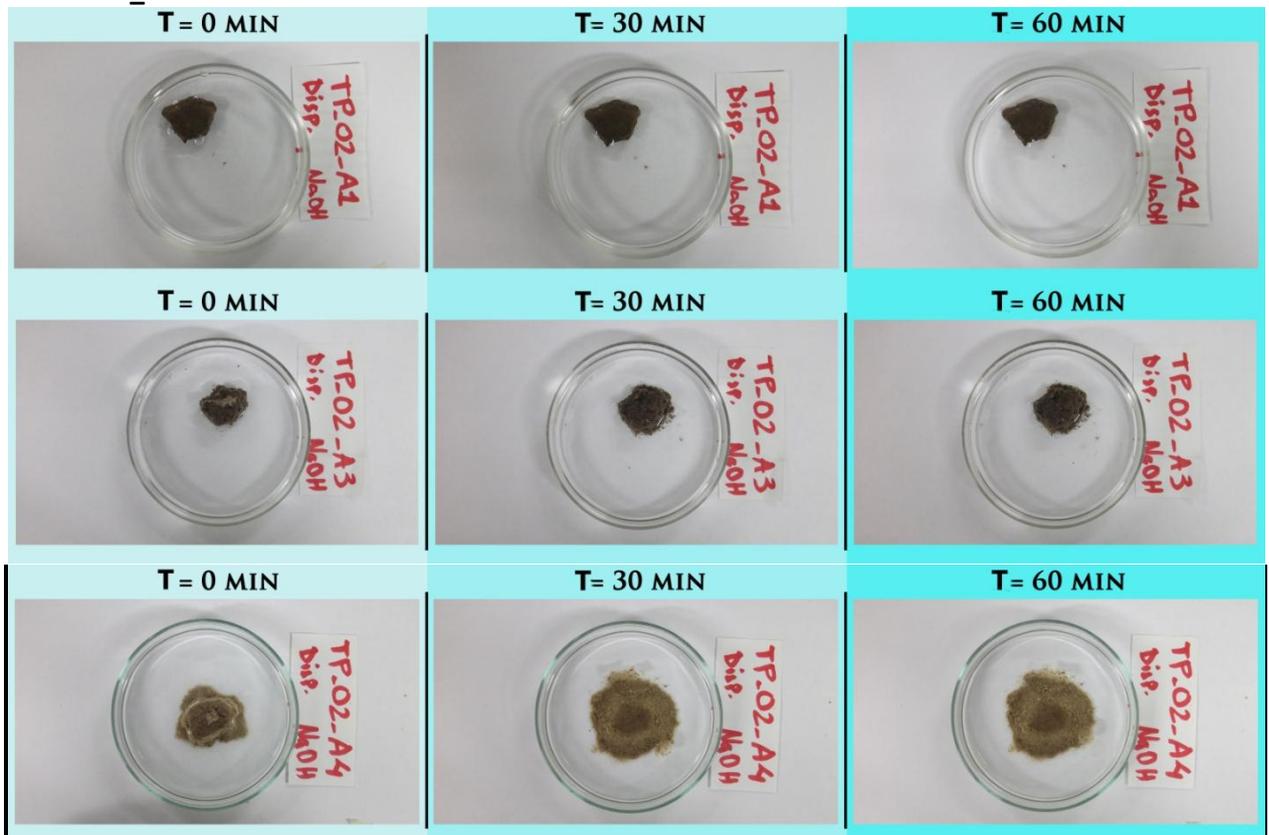


▪ Solución NaOH 1 normal: MC_02

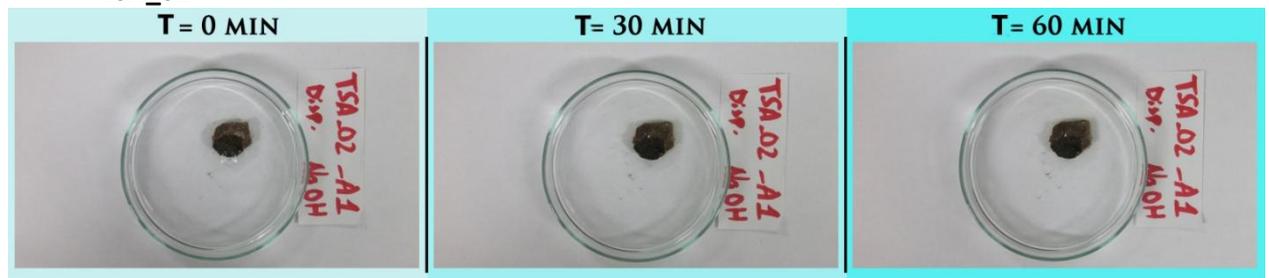


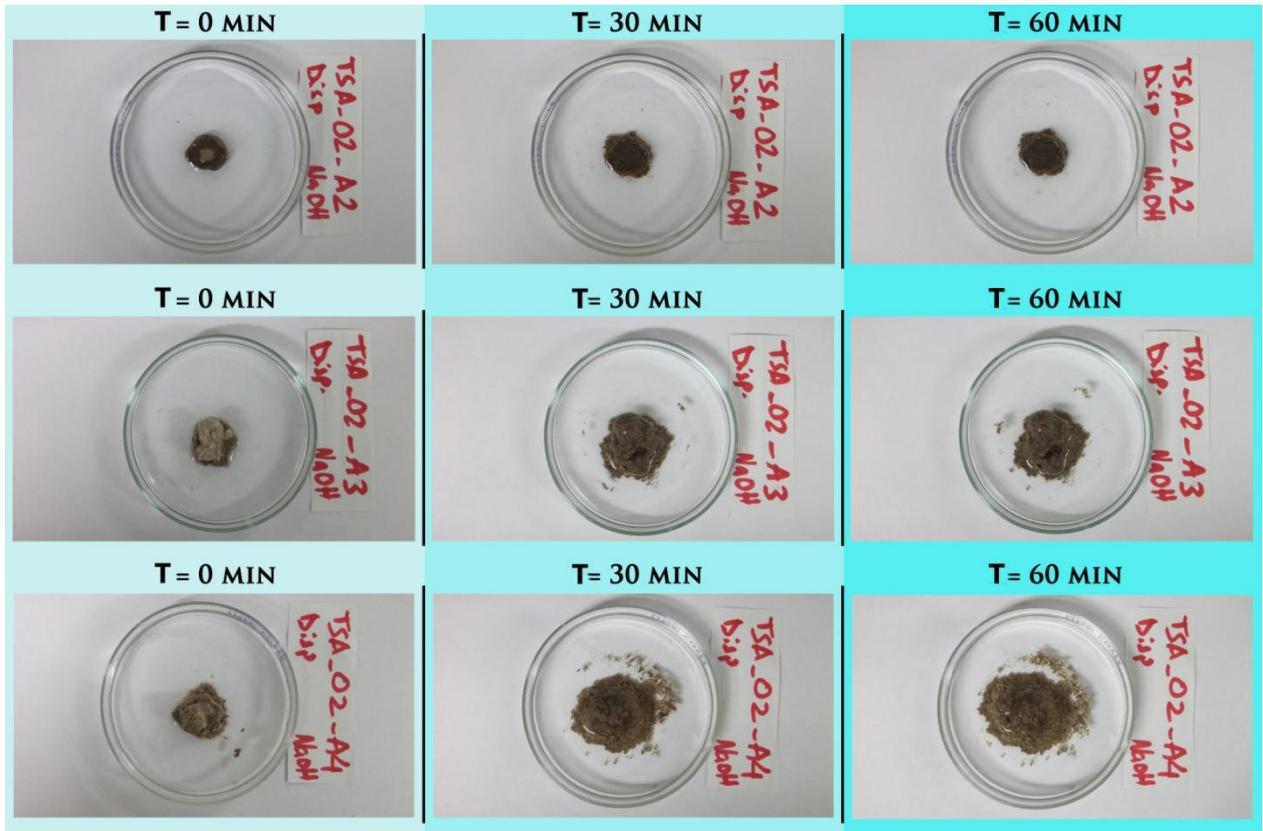


▪ TP_02



▪ TSA_02





II.1.4. Cálculos de Capacidad de Intercambio catiónico (CIC)

MUESTRA	Ag	Resta Blanco - Muestra	Wmuestra	CIC individual	CIC del Promedio
	ppm	ppm	g	$5.562 \times b-a/w = \text{Cmol}^{+}/\text{kg}$	$\text{Cmol}^{+}/\text{Kg}$
MC_01-A1	5,1	0,455	1,0017	2,526	2,776
MC_01-A1D	5,01	0,545	1,0018	3,026	
MC_01-A2	5,04	0,515	1,0079	2,842	2,768
MC_01-A2D	5,07	0,485	1,0013	2,694	
MC_01-A3	4,75	0,805	1,0076	4,444	4,069
MC_01-A3D	4,89	0,665	1,0013	3,694	
MC_01-B4	2,28	3,275	1,0078	18,075	18,412
MC_01-B4D	2,12	3,435	1,019	18,749	
MC_01-C1	5,03	0,525	1,0088	2,895	2,738
MC_01-C1D	5,09	0,465	1,0019	2,581	
TP_01-A1	4,88	0,675	1,0042	3,739	3,851
TP_01-A1D	4,84	0,715	1,0034	3,963	
TP_01-A2	5,36	0,195	1,0066	1,077	0,965
TP_01-A2D	5,4	0,155	1,0102	0,853	
TP_01-B6	4,77	0,785	1,0015	4,360	4,694
TP_01-B6D	4,65	0,905	1,001	5,029	
TP_01-C2	4,58	0,975	1,0184	5,325	5,326
TP_01-C2D	4,59	0,965	1,0076	5,327	
TP_01-D4	2,4	3,155	1,0052	17,457	17,723
TP_01-D4D	2,31	3,245	1,0033	17,989	
TSA_01-A1	5,33	0,225	1,0084	1,24102539	1,519
TSA_01-A1D	5,23	0,325	1,0064	1,79615461	
TSA_01-A3	4,68	0,875	1,0034	4,85025912	5,097
TSA_01-A3.D	4,59	0,965	1,0045	5,34328522	
TSA_01-B1	4,66	0,895	1,0058	4,94928415	4,811
TSA_01_B1.D	4,71	0,845	1,0059	4,67232329	
TSA_01-B3	4,46	1,095	1,0048	6,06129578	5,977
TSA_01-B3.D	4,48	1,075	1,0146	5,89311059	
TSA_01-B4	2,08	3,475	1,0075	19,1840695	18,656
TSA_01-B4.D	2,23	3,325	1,0202	18,127475	
TSA_01-C5	2,85	2,705	1,0084	14,919883	14,944
TSA_01-C5.D	2,71	2,845	1,0572	14,9677355	

Media

BT1	5,4	5,555
BT2	5,71	

MUESTRA	Ag	Resta Blanco - Muestra	Wmuestra	CIC individual	CIC del Promedio
mc-02 A1	5,61	0,265	1,0172	1,449	2,892
MC_02_A1.D	5,08	0,795	1,0198	4,336	
mc-02 A2	5,46	0,415	1,0165	2,271	3,279
MC_02_A2.D	5,09	0,785	1,0182	4,288	
mc-02 A3	4,96	0,915	1,0345	4,920	6,164
MC_02_A3.D	4,53	1,345	1,0098	7,408	
mc-02 B4	1,27	4,605	1,0082	25,405	26,168
MC_02_B4.D	1,02	4,855	1,0027	26,931	
mc-01 B5	4,2	1,675	1,0145	9,183	10,567
MC_01_B5.D	3,7	2,175	1,0122	11,952	

Media

blanco_MC_02	6,15	5,875
BLANCO_MC_02.D	5,6	

TP-02-A1	3,92	1,27	1,0461	6,752	6,696
TP-02-A1D	3,98	1,21	1,0135	6,640	
TP-02-A3	3,76	1,43	1,0905	7,294	7,498
TP-02-A3D	3,77	1,42	1,0255	7,702	
TP-02-A4	0,87	4,32	1,0418	23,064	23,288
TP-02-A4D	0,89	4,3	1,0172	23,512	
BLANCO TP-02	5,19				

TSA_02_A1	4,33	0,69	1,0039	3,8228708	3,051
TSA-02-A1.D	4,61	0,41	1,0008	2,27859712	
TSA_02_A2	3,77	1,25	1,0012	6,944167	6,997
TSA_02_A2.D	3,75	1,27	1,0021	7,04893723	
TSA-02-A3	3,87	1,15	1	6,3963	6,171
TSA_02_A3.D	3,95	1,07	1,0008	5,94658273	
TSA_02_A4	0,91	4,11	1,0004	22,8506797	22,823
TSA_02_A4.D	0,92	4,1	1,0004	22,795082	

Media

BLANCO TSA_02	5,06	5,02
BLANCO TSA.D_02	4,98	

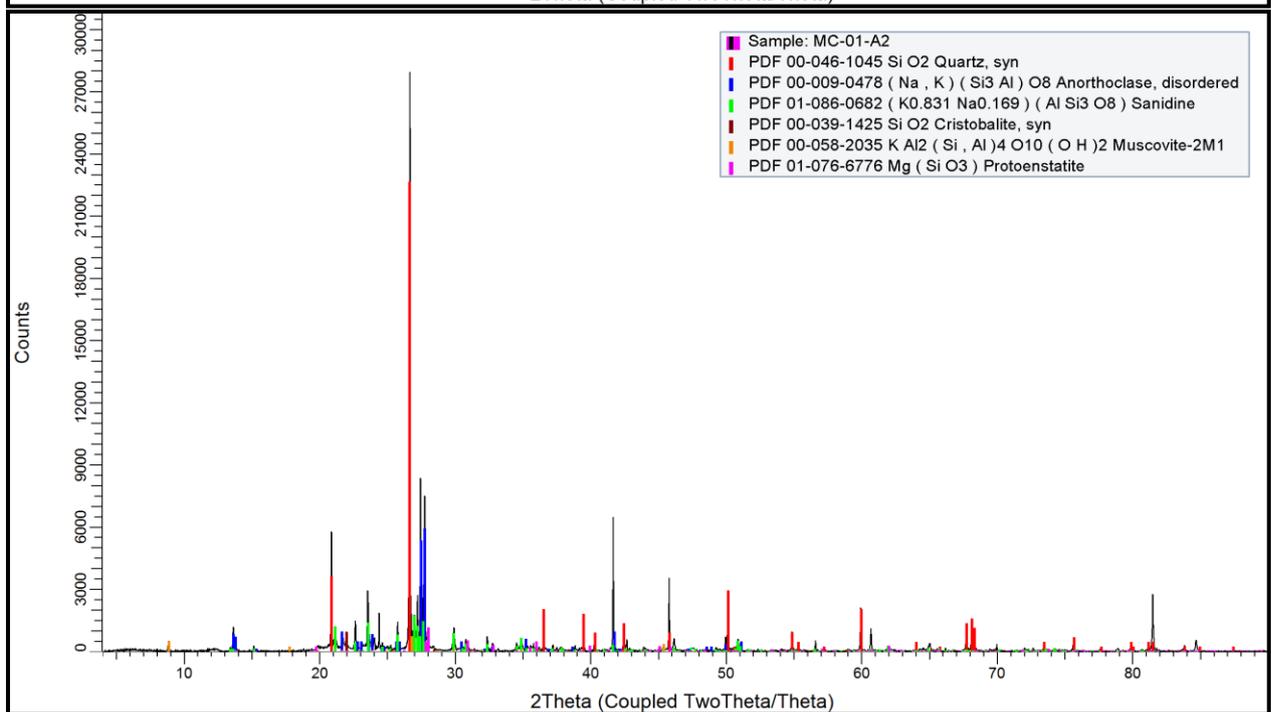
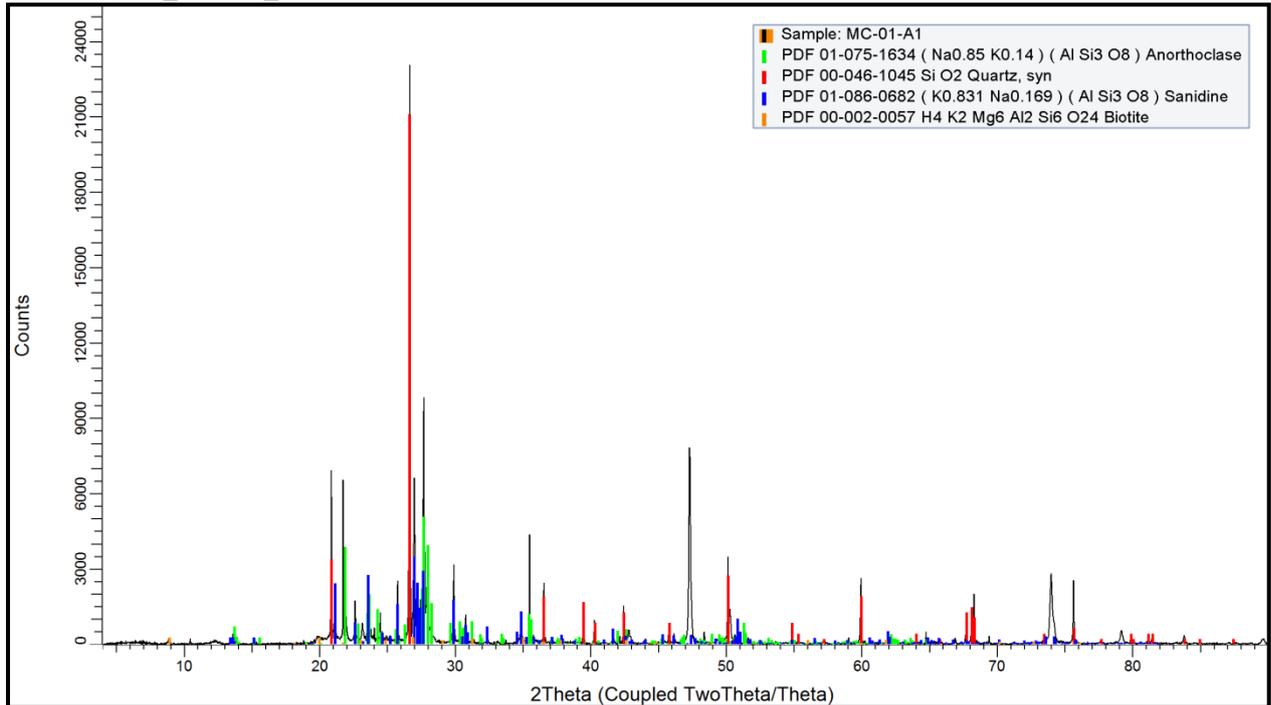
II.1.5. Cálculos de concentración de cationes intercambiables

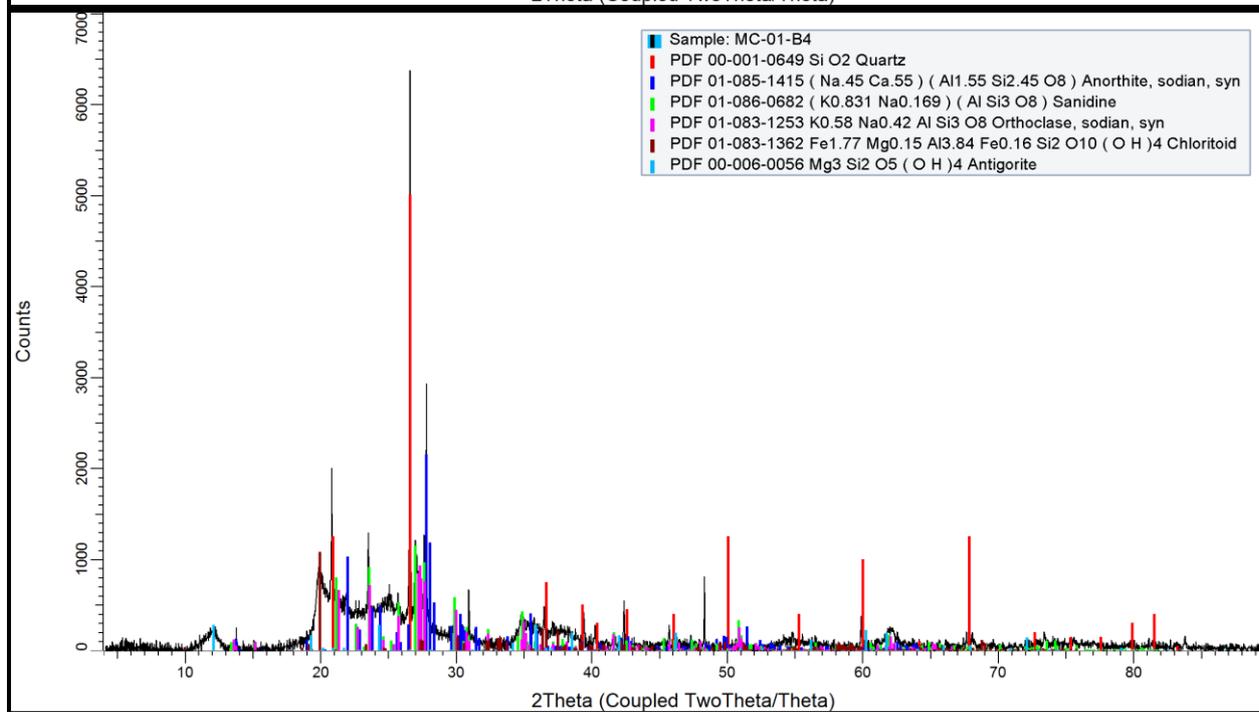
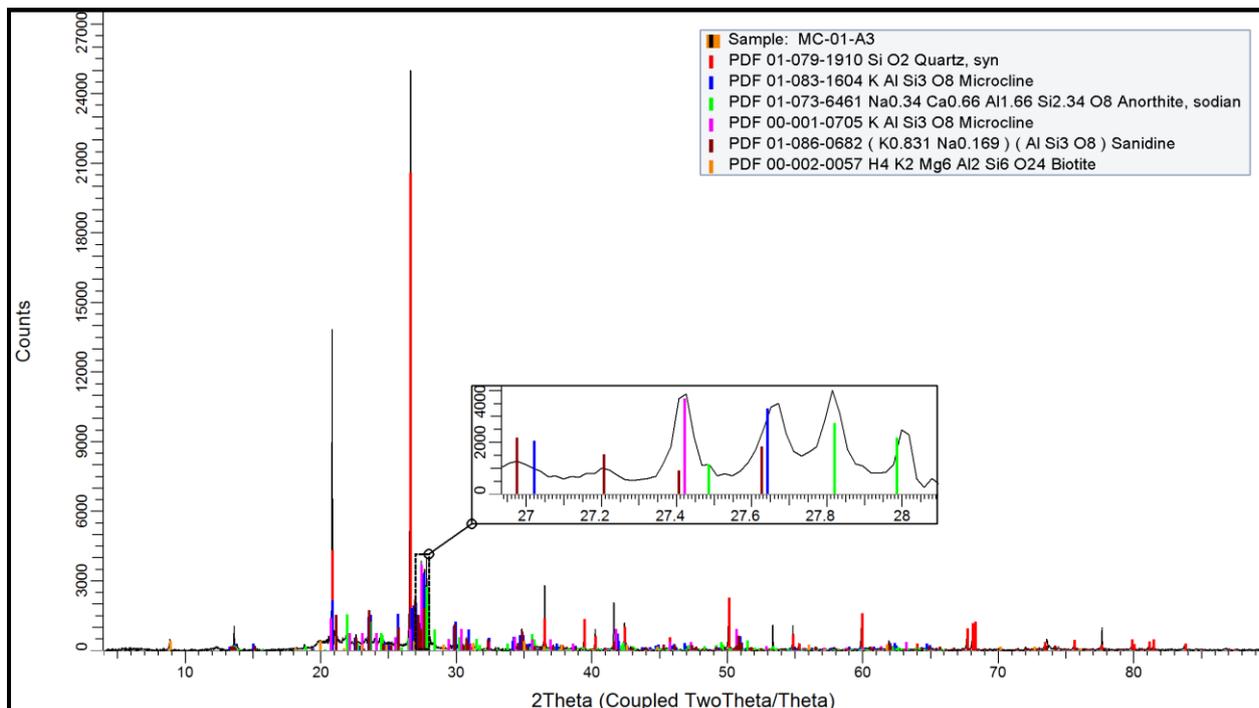
MUESTRA	Na Radial	Na Axial	Na Final	Na Fin Promedio	K Radial	K Axial	K Final	K Fin Promedio
	Concent. Promedio (mg/L)							
BT_1_lot1	0,9024	> L.S.C.	0,9024	0,8278	< L.I.C.	0,1655	0,1655	0,1385
BT_2_lot1	0,7532	> L.S.C.	0,7532		< L.I.C.	0,1116	0,1116	
MC_01_A1	< L.I.C.	0,7173	0,7173	0,6645	< L.I.C.	1,9208	1,9208	1,8489
MC_01_A1.D	< L.I.C.	0,6118	0,6118		< L.I.C.	1,7770	1,7770	
MC_01_A2	< L.I.C.	2,0037	2,0037	1,3450	< L.I.C.	8,2140	8,2140	5,4625
MC_01_A2.D	0,7672	0,6054	0,6863		< L.I.C.	2,7110	2,7110	
MC_01_A3	< L.I.C.	0,7922	0,7922	0,7430	< L.I.C.	11,5558	11,5558	10,7384
MC_01_A3.D	0,7444	0,6431	0,6937		9,9211	> L.S.C.	9,9211	
MC_01_B4	21,9340	> L.S.C.	21,9340	22,6850	28,2660	> L.S.C.	28,2660	29,2328
MC_01_B4.D	23,4360	> L.S.C.	23,4360		30,1996	> L.S.C.	30,1996	
MC_01_C1	0,7413	0,6991	0,7202	0,6913	< L.I.C.	2,9026	2,9026	2,7887
MC_01_C1.D	0,6685	0,6564	0,6625		< L.I.C.	2,6749	2,6749	
TP_01_A1	0,8548	> L.S.C.	0,8548	0,8962	6,3564	> L.S.C.	6,3564	6,3472
TP_01_A1.D	0,9377	> L.S.C.	0,9377		6,3380	> L.S.C.	6,3380	
TP_01_A2	0,8337	> L.S.C.	0,8337	0,8070	6,9175	> L.S.C.	6,9175	6,8004
TP_01_A2.D	0,7803	> L.S.C.	0,7803		6,6833	> L.S.C.	6,6833	
TP_01_B6	6,1637	> L.S.C.	6,1637	6,1527	8,3045	> L.S.C.	8,3045	8,2409
TP_01_B6.D	6,1416	> L.S.C.	6,1416		8,1773	> L.S.C.	8,1773	
TP_01_C2	0,8464	> L.S.C.	0,8464	0,8369	6,8490	> L.S.C.	6,8490	6,6666
TP_01_C2.D	0,8274	> L.S.C.	0,8274		6,4842	> L.S.C.	6,4842	
TP_01_D4	19,4989	> L.S.C.	19,4989	19,9714	32,5009	> L.S.C.	32,5009	33,3025
TP_01_D4.D	20,4440	> L.S.C.	20,4440		34,1042	> L.S.C.	34,1042	
TSA_01_A1	2,9405	> L.S.C.	2,9405	2,9077	11,0772	> L.S.C.	11,0772	10,9388
TSA_01A_1.D	2,8750	> L.S.C.	2,8750		10,8004	> L.S.C.	10,8004	
TSA_01_A3	1,0396	> L.S.C.	1,0396	1,0686	7,7106	> L.S.C.	7,7106	7,8041
TSA_01_A3.D	1,0975	> L.S.C.	1,0975		7,8976	> L.S.C.	7,8976	
TSA_01_B1	0,9880	> L.S.C.	0,9880	1,0671	3,8737	> L.S.C.	3,8737	3,9229
TSA_01_B1.D	1,1463	> L.S.C.	1,1463		3,9721	> L.S.C.	3,9721	
TSA_01_B3	0,9429	> L.S.C.	0,9429	0,9178	9,3208	> L.S.C.	9,3208	9,2457
TSA_01_B3.D	0,8927	> L.S.C.	0,8927		9,1706	> L.S.C.	9,1706	
TSA_01_B4	4,2643	> L.S.C.	4,2643	4,1635	18,5269	> L.S.C.	18,5269	18,2497
TSA_01_B4.D	4,0628	> L.S.C.	4,0628		17,9724	> L.S.C.	17,9724	
TSA_01_C5	3,8094	> L.S.C.	3,8094	3,8570	17,7352	> L.S.C.	17,7352	18,0414
TSA_01_C5.D	3,9047	> L.S.C.	3,9047		18,3476	> L.S.C.	18,3476	
Blanco_MC_02	0,7164	0,7488	0,7326	0,7225	< L.I.C.	0,1335	0,1335	0,1049
Blanco_MC_02.D	0,6973	0,7276	0,7125		< L.I.C.	0,0762	0,0762	
MC_02_A1	1,3221	> L.S.C.	1,3221	1,3193	5,8575	> L.S.C.	5,8575	5,9150
MC_02_A1.D	1,3165	> L.S.C.	1,3165		5,9726	> L.S.C.	5,9726	
MC_02_A2	0,7776	> L.S.C.	0,7776	0,7699	4,0181	> L.S.C.	4,0181	4,0118
MC_02_A2.D	0,7622	> L.S.C.	0,7622		4,0055	> L.S.C.	4,0055	
MC_02_A3	8,5792	> L.S.C.	8,5792	8,4329	13,5922	> L.S.C.	13,5922	13,3275
MC_02_A3.D	8,2865	> L.S.C.	8,2865		13,0627	> L.S.C.	13,0627	
MC_02_B4	29,0499	> L.S.C.	29,0499	29,0553	25,5776	> L.S.C.	25,5776	25,5679
MC_02_B4.D	29,0608	> L.S.C.	29,0608		25,5581	> L.S.C.	25,5581	
MC_01_B5	6,6194	> L.S.C.	6,6194	6,6203	14,4353	> L.S.C.	14,4353	14,2762
MC_01_B5.D	6,6213	> L.S.C.	6,6213		14,1170	> L.S.C.	14,1170	
Blanco_TP_02	0,6055	0,6278	0,6166	0,6166	< L.I.C.	0,0732	0,0732	0,0732
TP_02_A1	1,4853	> L.S.C.	1,4853	1,3383	9,5268	> L.S.C.	9,5268	9,2857
TP_02_A1.D	1,1912	> L.S.C.	1,1912		9,0446	> L.S.C.	9,0446	
TP_02_A3	1,8108	> L.S.C.	1,8108	1,8387	10,7291	> L.S.C.	10,7291	10,4479
TP_02_A3.D	1,8667	> L.S.C.	1,8667		10,1668	> L.S.C.	10,1668	
TP_02_A4	13,1902	> L.S.C.	13,1902	13,0884	27,9063	> L.S.C.	27,9063	27,6753
TP_02_A4.D	12,9866	> L.S.C.	12,9866		27,4443	> L.S.C.	27,4443	
Blanco_TSA_02	0,6006	0,5939	0,5972	0,6320	< L.I.C.	0,1112	0,1112	0,1471
Blanco_TSA_02.D	0,6550	0,6785	0,6668		< L.I.C.	0,1831	0,1831	
TSA_02_A1	0,7783	> L.S.C.	0,7783	0,8381	4,5016	> L.S.C.	4,5016	4,5039
TSA_02_A1.D	0,8978	> L.S.C.	0,8978		4,5062	> L.S.C.	4,5062	
TSA_02_A2	1,1531	> L.S.C.	1,1531	1,1853	10,6036	> L.S.C.	10,6036	10,6445
TSA_02_A2.D	1,2175	> L.S.C.	1,2175		10,6853	> L.S.C.	10,6853	
TSA_02_A3	1,3214	> L.S.C.	1,3214	1,3007	9,9694	> L.S.C.	9,9694	10,0100
TSA_02_A3.D	1,2801	> L.S.C.	1,2801		10,0506	> L.S.C.	10,0506	
TSA_02_A4	17,0095	> L.S.C.	17,0095	16,9473	29,1653	> L.S.C.	29,1653	29,0186
TSA_02_A4.D	16,8851	> L.S.C.	16,8851		28,8720	> L.S.C.	28,8720	

MUESTRA	Ca Radial	Ca Final	Ca Axial	Ca Fin Promedio	Mg Radial	Mg Axial	Mg Final	Mg Fin Promedio
	Concent. Promedio (mg/L)							
BT_1_lot1	< L.I.C.	0,6094	0,6094	0,4179	0,2231	0,1914	0,2072	0,1483
BT_2_lot1	< L.I.C.	0,2265	0,2265		0,0969	0,0817	0,0893	
MC_01_A1	3,2068	< L.I.C.	3,2068	3,1074	< L.I.C.	0,2696	0,2696	0,2611
MC_01_A1.D	3,0080	< L.I.C.	3,0080		< L.I.C.	0,2526	0,2526	
MC_01_A2	11,2690	< L.I.C.	11,2690	7,6229	< L.I.C.	1,6971	1,6971	1,1738
MC_01_A2.D	3,9767	> L.S.C.	3,9767		0,6682	0,6330	0,6506	
MC_01_A3	7,6721	> L.I.C.	7,6721	8,3116	4,2958	< L.I.C.	4,2958	3,9129
MC_01_A3.D	8,9511	> L.S.C.	8,9511		3,5301	> L.S.C.	3,5301	
MC_01_B4	59,4963	> L.S.C.	59,4963	59,9424	23,0851	> L.S.C.	23,0851	23,7178
MC_01_B4.D	60,3886	> L.S.C.	60,3886		24,3505	> L.S.C.	24,3505	
MC_01_C1	9,8224	> L.S.C.	9,8224	9,7205	1,4038	> L.S.C.	1,4038	1,3743
MC_01_C1.D	9,6186	> L.S.C.	9,6186		1,3447	> L.S.C.	1,3447	
TP_01_A1	8,3399	> L.S.C.	8,3399	8,0588	1,0241	> L.S.C.	1,0241	1,0584
TP_01_A1.D	7,7778	> L.S.C.	7,7778		1,0927	> L.S.C.	1,0927	
TP_01_A2	25,0758	> L.S.C.	25,0758	25,3393	3,8451	> L.S.C.	3,8451	3,8502
TP_01_A2.D	25,6028	> L.S.C.	25,6028		3,8552	> L.S.C.	3,8552	
TP_01_B6	7,9464	> L.S.C.	7,9464	7,9253	4,0962	> L.S.C.	4,0962	4,0732
TP_01_B6.D	7,9043	> L.S.C.	7,9043		4,0502	> L.S.C.	4,0502	
TP_01_C2	26,9237	> L.S.C.	26,9237	26,3757	4,1560	> L.S.C.	4,1560	4,0615
TP_01_C2.D	25,8276	> L.S.C.	25,8276		3,9671	> L.S.C.	3,9671	
TP_01_D4	85,9000	> L.S.C.	85,9000	88,6296	12,4560	> L.S.C.	12,4560	12,7557
TP_01_D4.D	91,3592	> L.S.C.	91,3592		13,0555	> L.S.C.	13,0555	
TSA_01_A1	15,0146	> L.S.C.	15,0146	14,7546	3,6300	> L.S.C.	3,6300	3,5879
TSA_01A_1.D	14,4947	> L.S.C.	14,4947		3,5457	> L.S.C.	3,5457	
TSA_01_A3	43,6245	> L.S.C.	43,6245	43,5964	5,6325	> L.S.C.	5,6325	5,6644
TSA_01_A3.D	43,5683	> L.S.C.	43,5683		5,6963	> L.S.C.	5,6963	
TSA_01_B1	9,3797	> L.S.C.	9,3797	9,7697	1,0001	> L.S.C.	1,0001	1,0157
TSA_01_B1.D	10,1596	> L.S.C.	10,1596		1,0313	> L.S.C.	1,0313	
TSA_01_B3	45,4794	> L.S.C.	45,4794	46,1433	4,7802	> L.S.C.	4,7802	4,7792
TSA_01_B3.D	46,8073	> L.S.C.	46,8073		4,7782	> L.S.C.	4,7782	
TSA_01_B4	88,8791	> L.S.C.	88,8791	87,2982	17,2284	> L.S.C.	17,2284	16,9360
TSA_01_B4.D	85,7174	> L.S.C.	85,7174		16,6436	> L.S.C.	16,6436	
TSA_01_C5	75,7123	> L.S.C.	75,7123	76,9805	12,1282	> L.S.C.	12,1282	12,3661
TSA_01_C5.D	78,2487	> L.S.C.	78,2487		12,6039	> L.S.C.	12,6039	
Blanco_MC_02	< L.I.C.	0,2924	0,2924	0,2970	0,1347	0,1201	0,1274	0,1361
Blanco_MC_02.D	< L.I.C.	0,3017	0,3017		0,1506	0,1390	0,1448	
MC_02_A1	12,4290	> L.S.C.	12,4290	12,5204	0,8860	> L.S.C.	0,8860	0,8868
MC_02_A1.D	12,6117	> L.S.C.	12,6117		0,8876	> L.S.C.	0,8876	
MC_02_A2	15,8718	> L.S.C.	15,8718	16,0053	0,7573	0,6981	0,7277	0,7397
MC_02_A2.D	16,1388	> L.S.C.	16,1388		0,7817	0,7217	0,7517	
MC_02_A3	11,1292	> L.S.C.	11,1292	10,4090	11,6869	> L.S.C.	11,6869	11,4723
MC_02_A3.D	9,6889	> L.S.C.	9,6889		11,2578	> L.S.C.	11,2578	
MC_02_B4	323,1123	> L.S.C.	323,1123	332,2461	26,9203	> L.S.C.	26,9203	26,9025
MC_02_B4.D	341,3799	> L.S.C.	341,3799		26,8846	> L.S.C.	26,8846	
MC_01_B5	34,8912	> L.S.C.	34,8912	34,0621	13,4077	> L.S.C.	13,4077	13,4915
MC_01_B5.D	33,2330	> L.S.C.	33,2330		13,5754	> L.S.C.	13,5754	
Blanco_TP_02	< L.I.C.	0,2197	0,2197	0,2197				0,1279
TP_02_A1	31,4555	> L.S.C.	31,4555	31,1006	2,8527	> L.S.C.	2,8527	2,7994
TP_02_A1.D	30,7458	> L.S.C.	30,7458		2,7461	> L.S.C.	2,7461	
TP_02_A3	36,7460	> L.S.C.	36,7460	36,5177	5,5574	> L.S.C.	5,5574	5,4356
TP_02_A3.D	36,2894	> L.S.C.	36,2894		5,3138	> L.S.C.	5,3138	
TP_02_A4	271,5835	> L.S.C.	271,5835	266,0962	21,6303	> L.S.C.	21,6303	21,3775
TP_02_A4.D	260,6089	> L.S.C.	260,6089		21,1247	> L.S.C.	21,1247	
Blanco_TSA_02	< L.I.C.	0,2013	0,2013	0,2399	0,1108	0,0981	0,1044	0,1205
Blanco_TSA_02.D	< L.I.C.	0,2786	0,2786		0,1439	0,1293	0,1366	
TSA_02_A1	10,1456	> L.S.C.	10,1456	10,0507	1,1389	> L.S.C.	1,1389	1,1595
TSA_02_A1.D	9,9559	> L.S.C.	9,9559		1,1802	> L.S.C.	1,1802	
TSA_02_A2	33,7178	> L.S.C.	33,7178	33,6792	5,3820	> L.S.C.	5,3820	5,3264
TSA_02_A2.D	33,6406	> L.S.C.	33,6406		5,2708	> L.S.C.	5,2708	
TSA_02_A3	32,7201	> L.S.C.	32,7201	32,4496	5,5557	> L.S.C.	5,5557	5,5365
TSA_02_A3.D	32,1791	> L.S.C.	32,1791		5,5173	> L.S.C.	5,5173	
TSA_02_A4	256,3652	> L.S.C.	256,3652	249,2724	22,8985	> L.S.C.	22,8985	22,7896
TSA_02_A4.D	242,1796	> L.S.C.	242,1796		22,6807	> L.S.C.	22,6807	

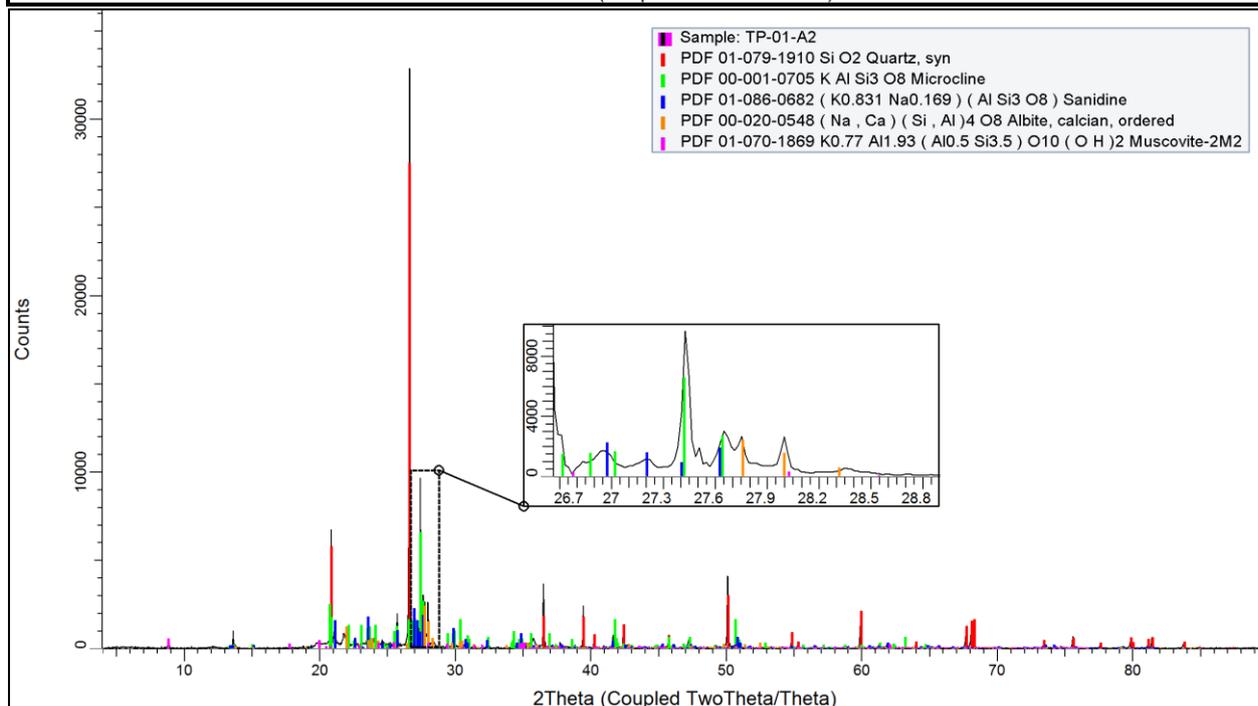
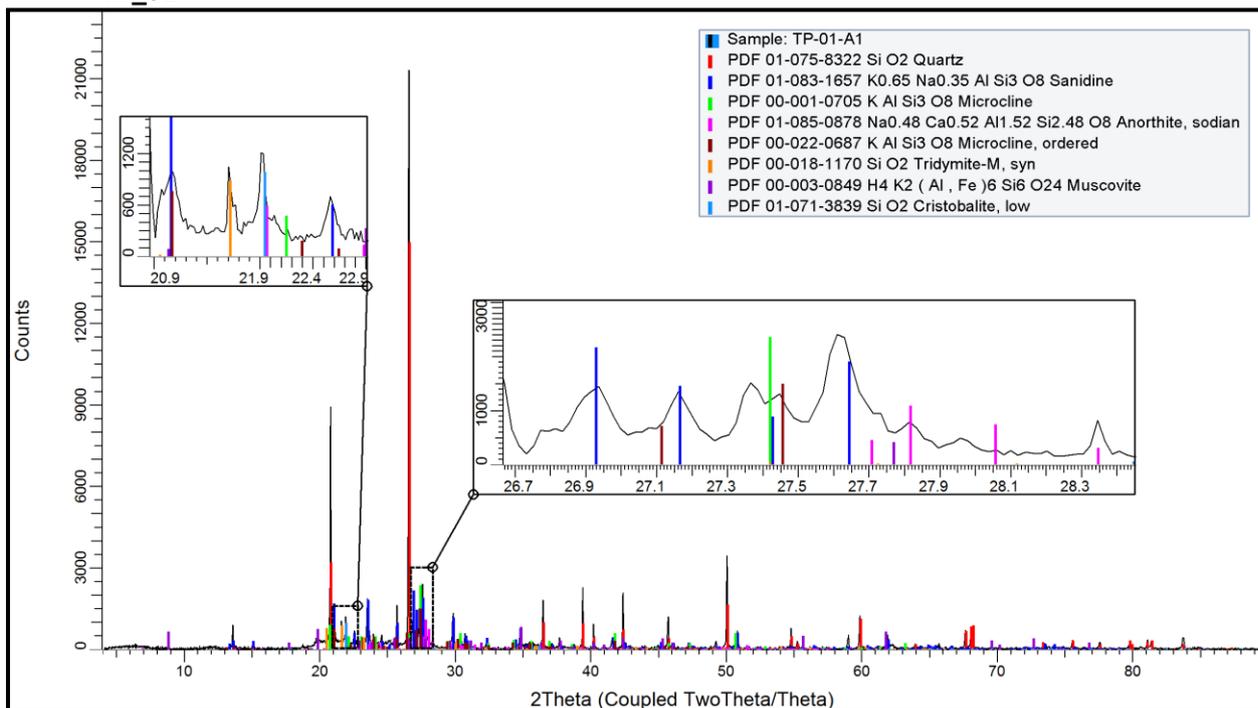
II.1.6. Difracción de Rayos X

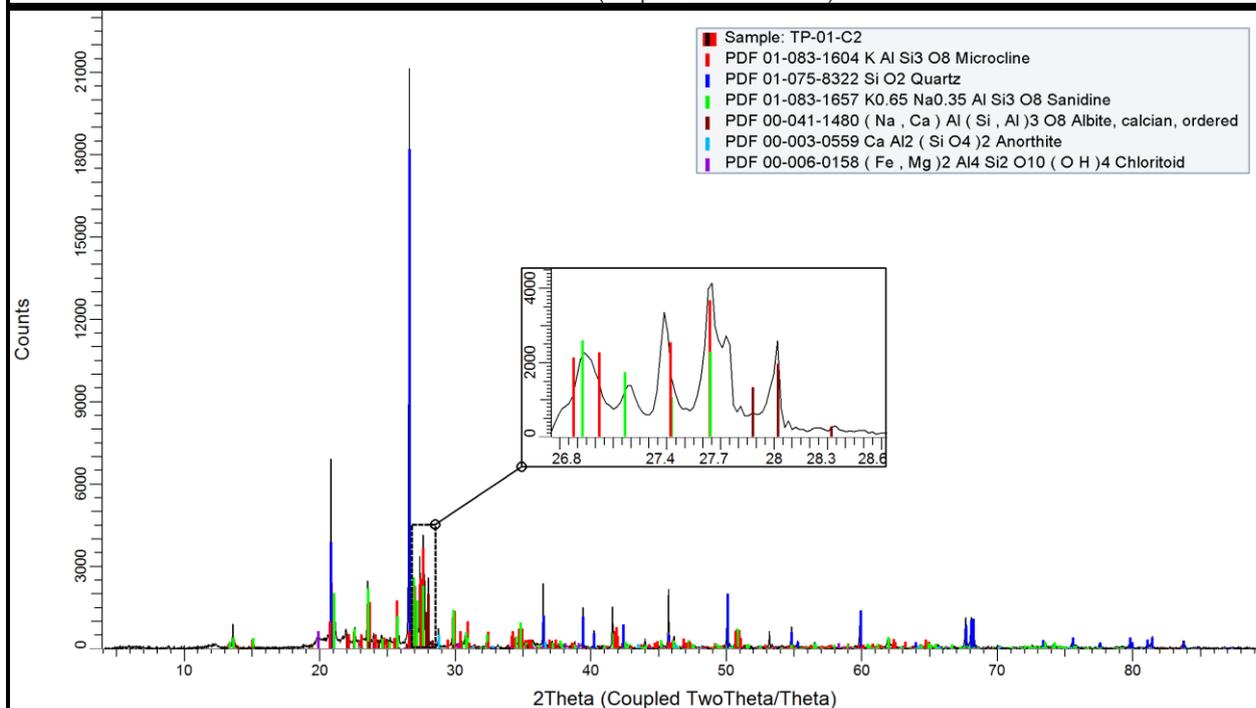
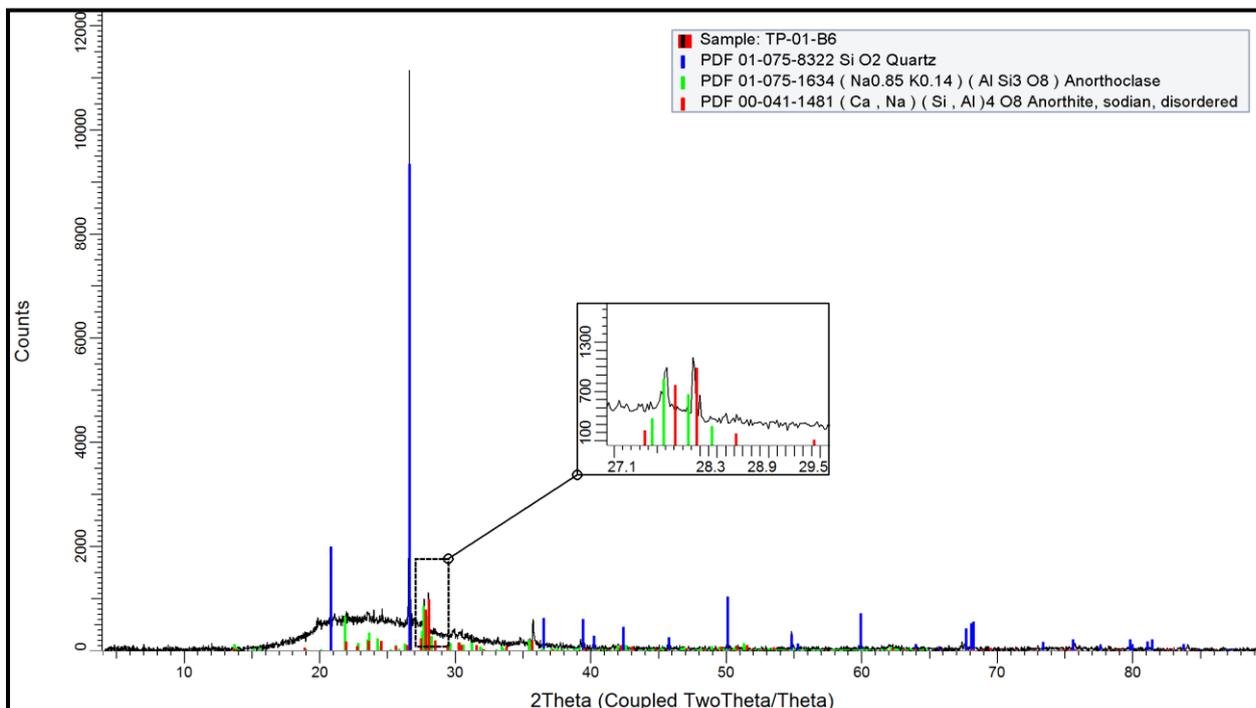
• LOTE_01: MC_01

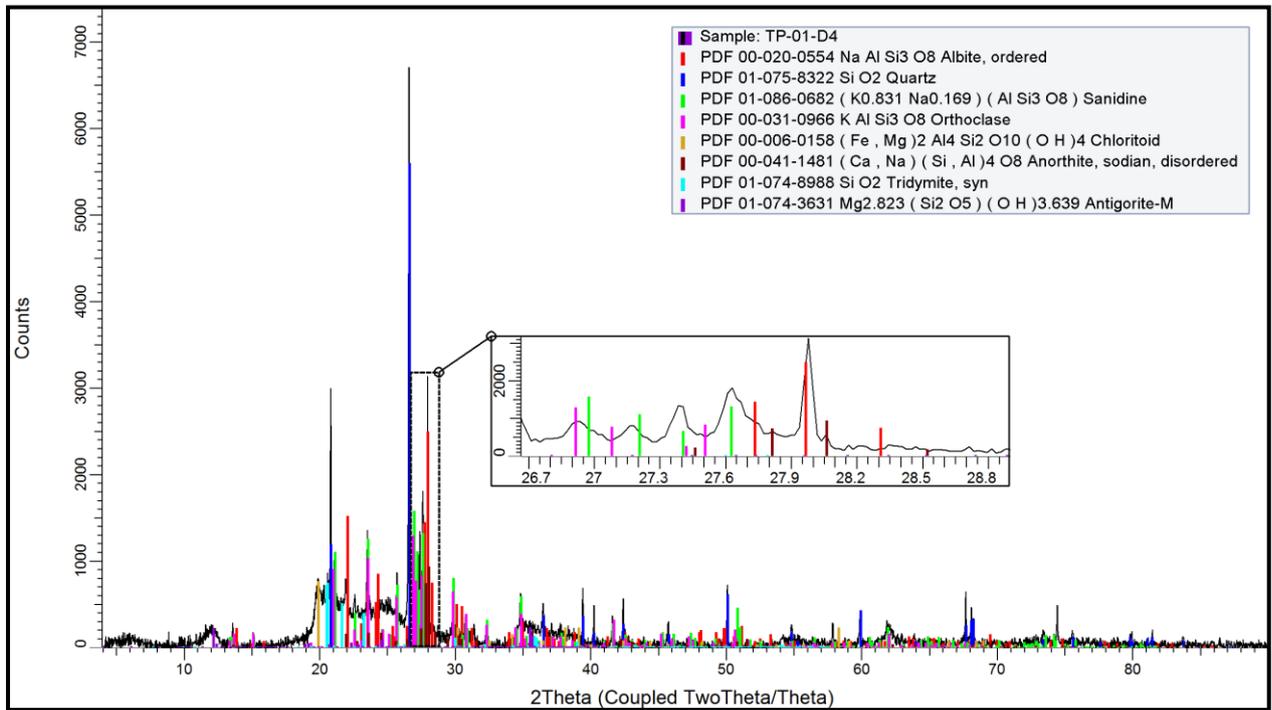




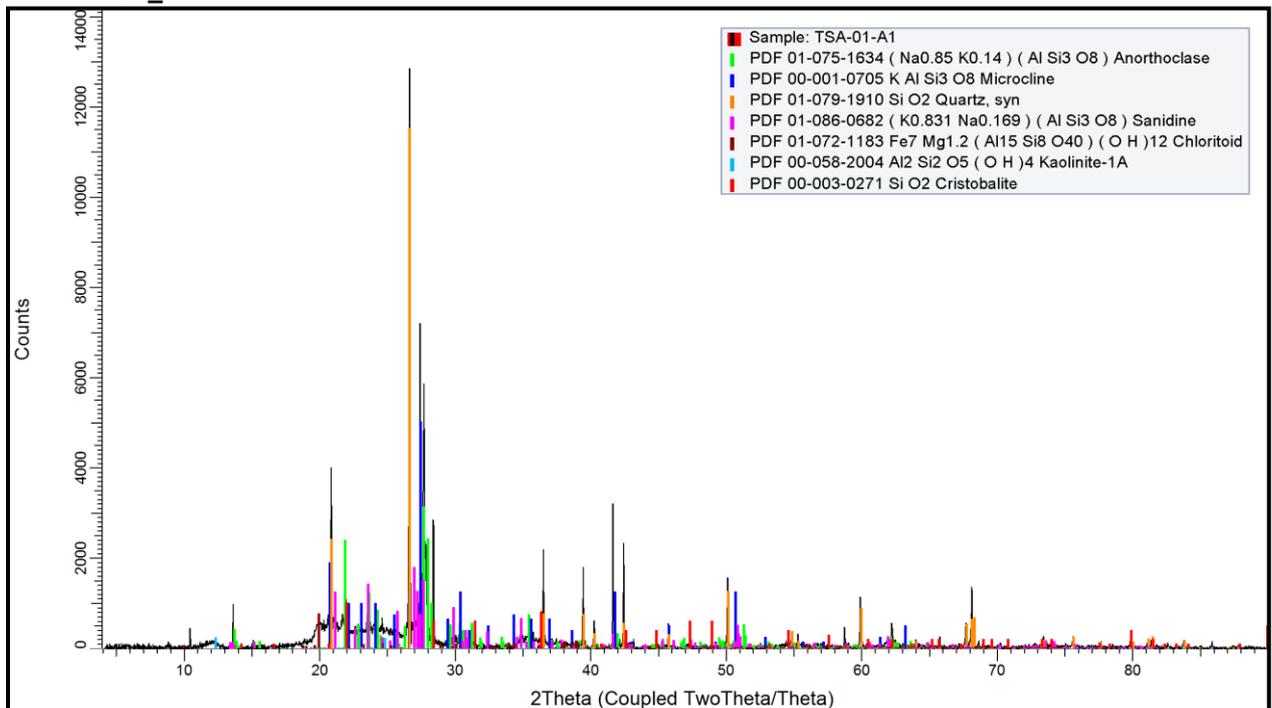
• TP_01

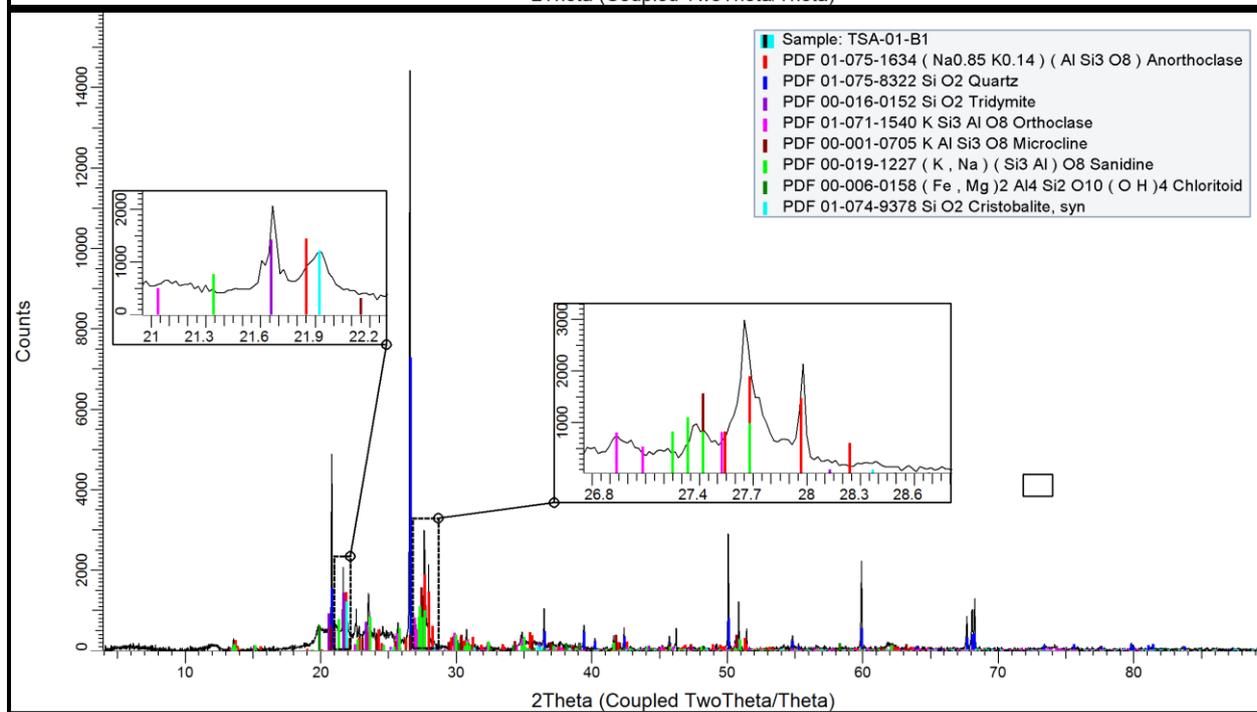
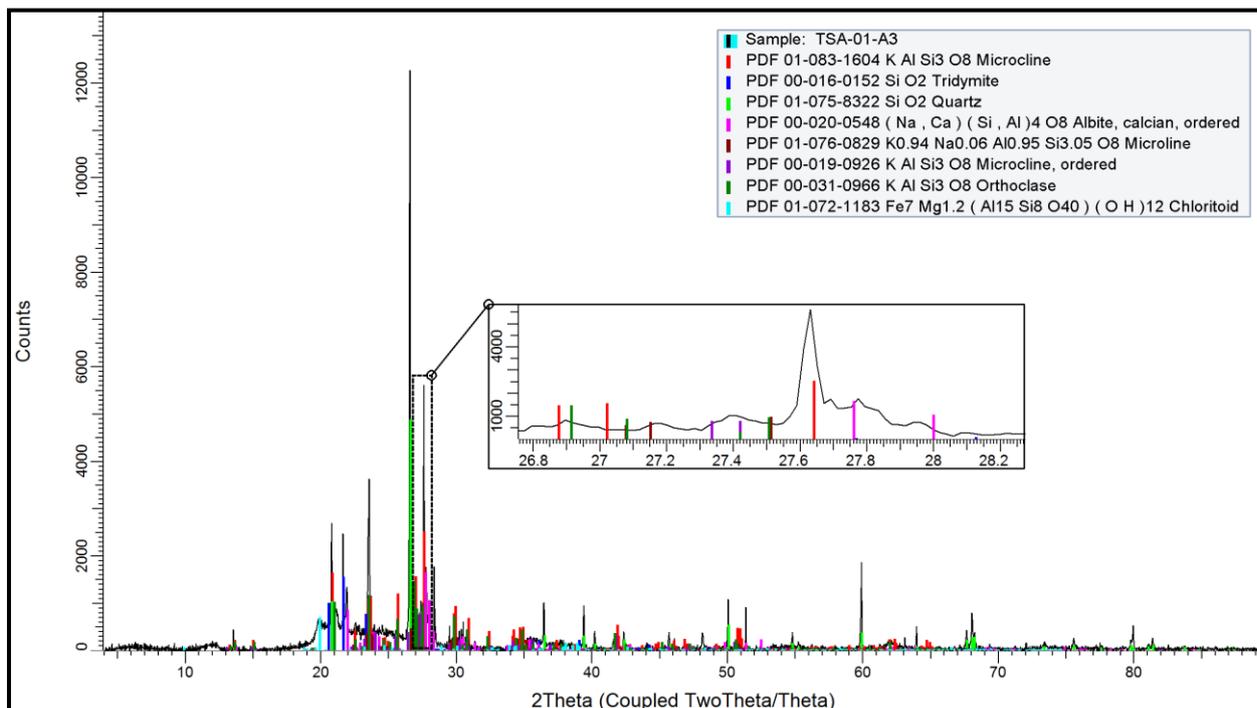


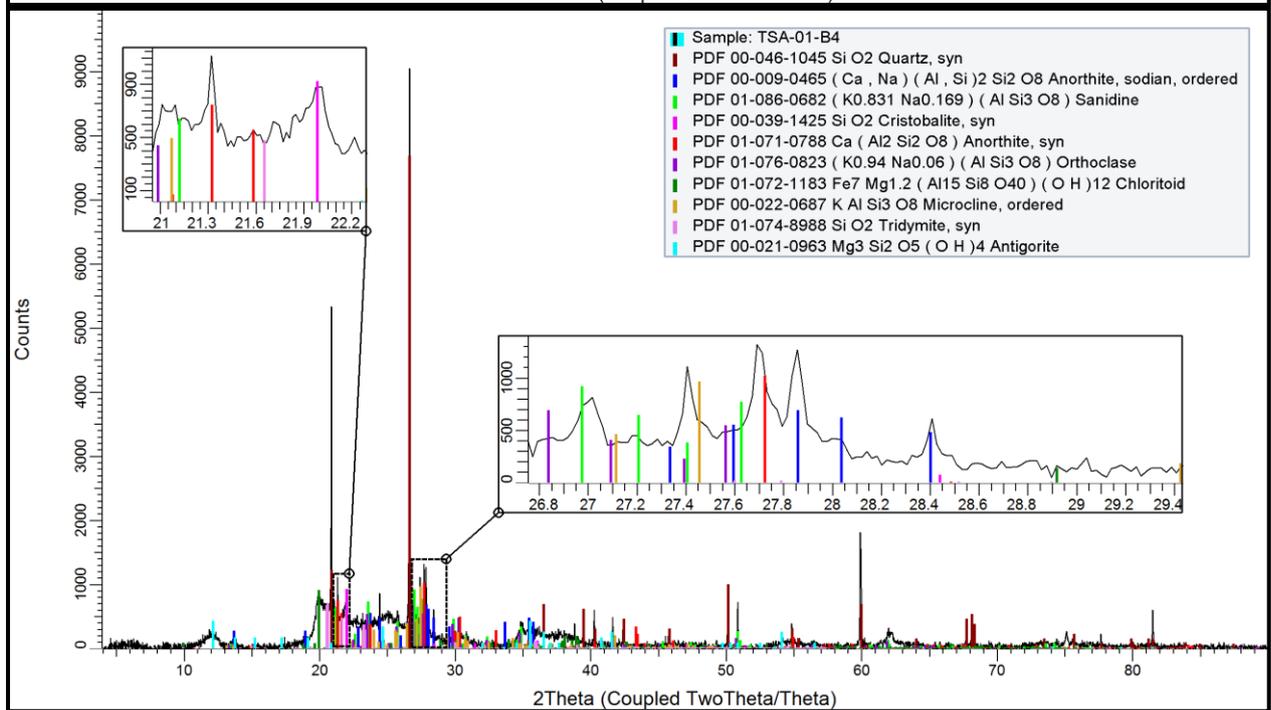
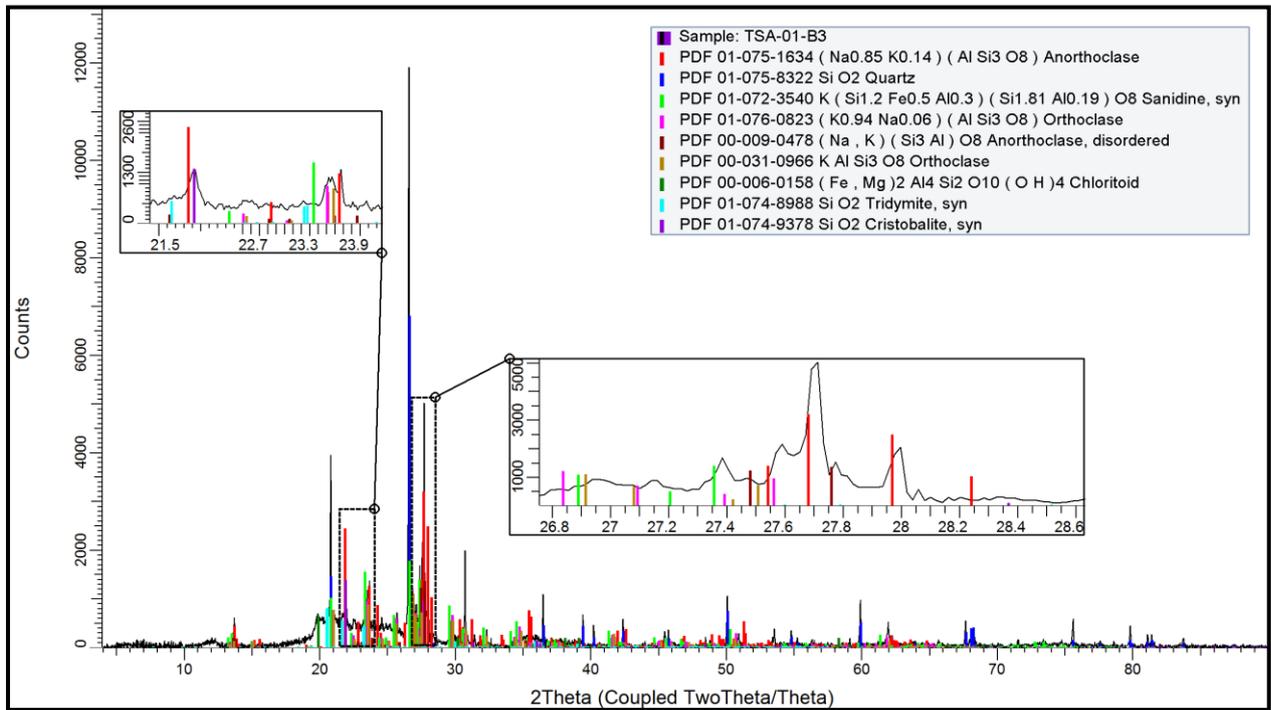


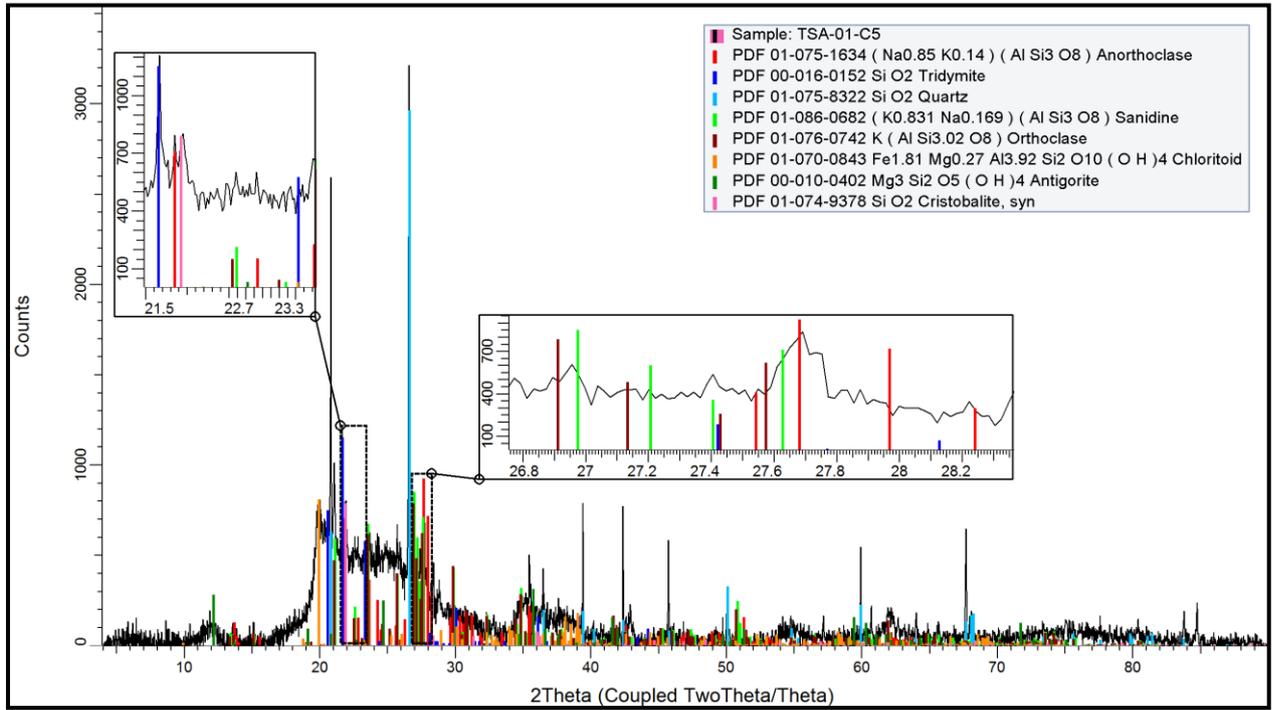


• TSA_01

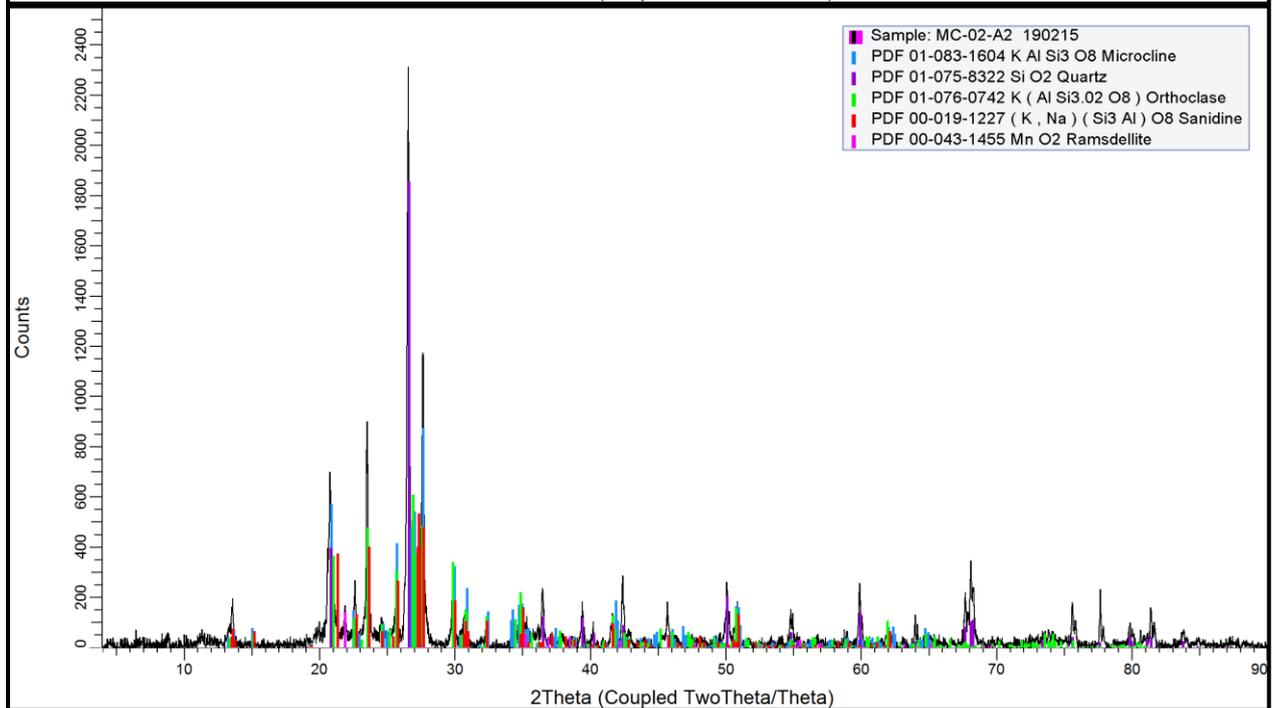
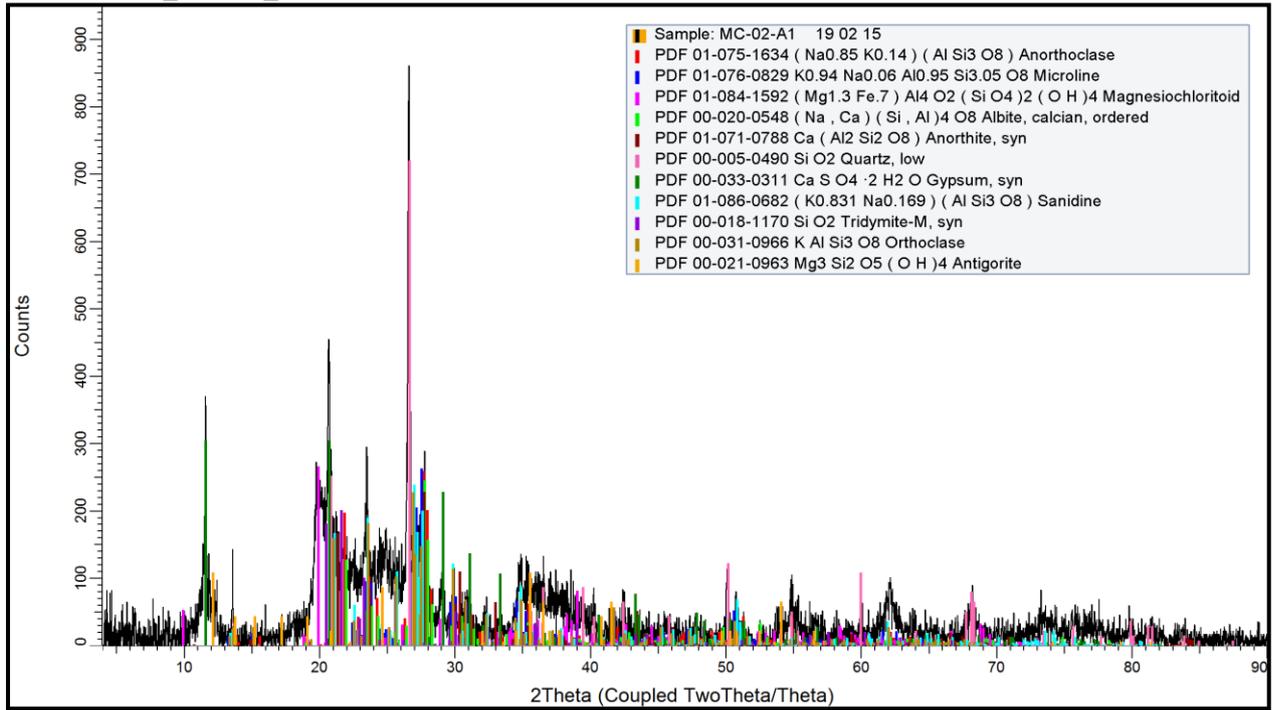


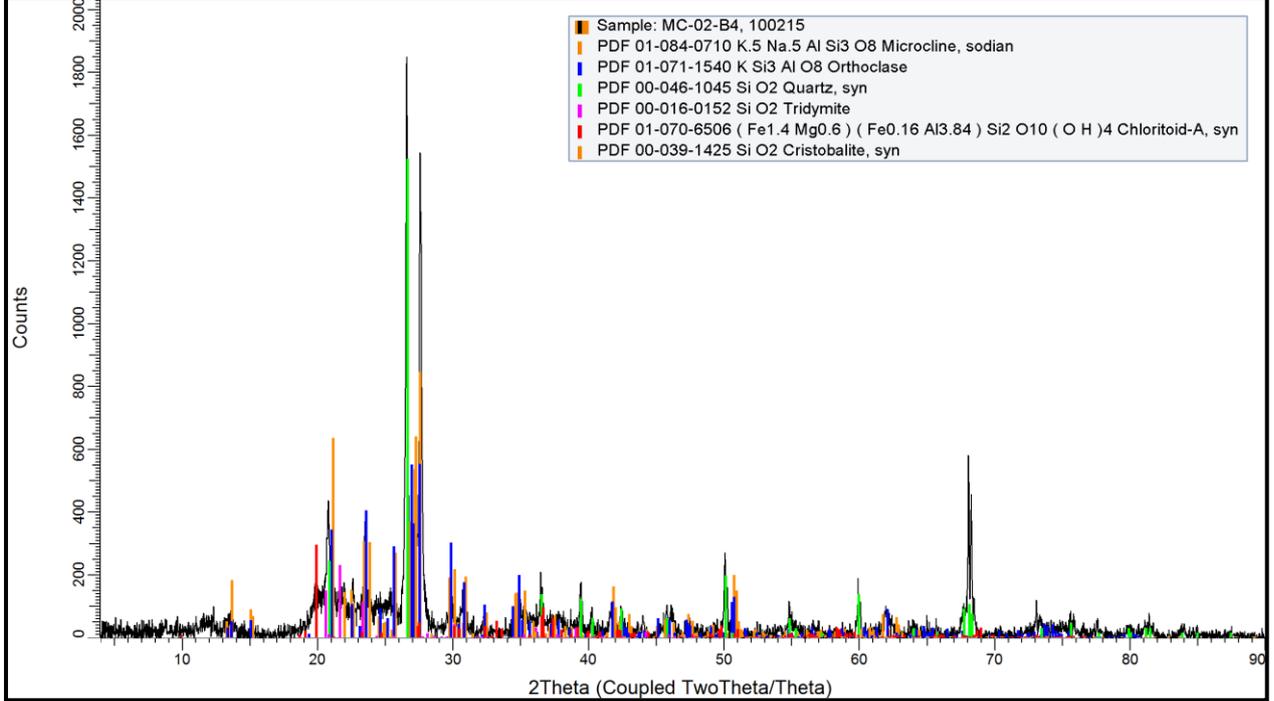
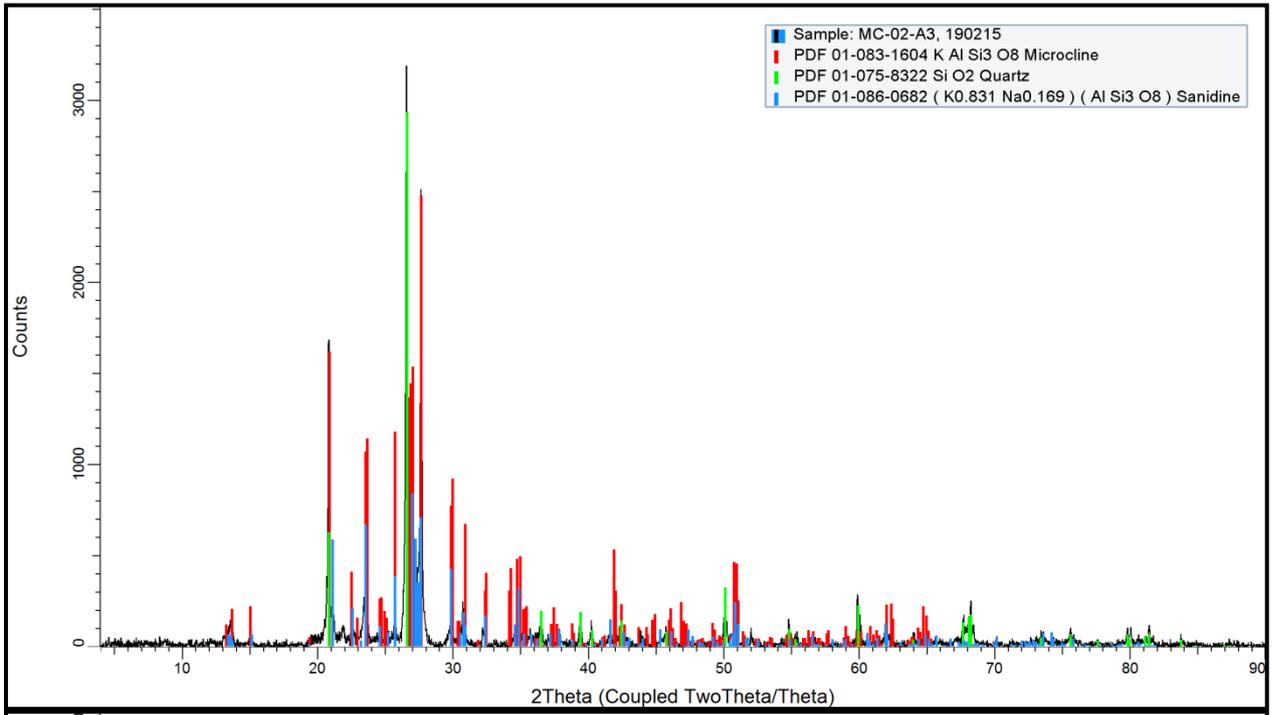




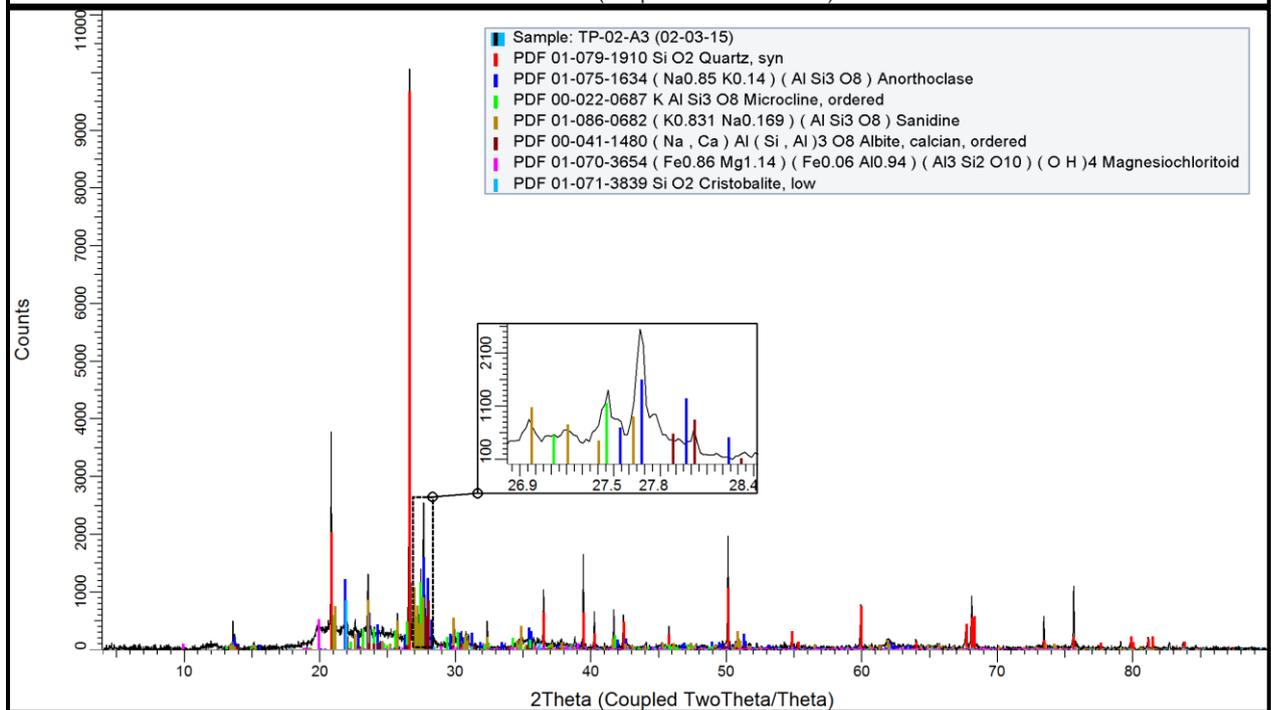
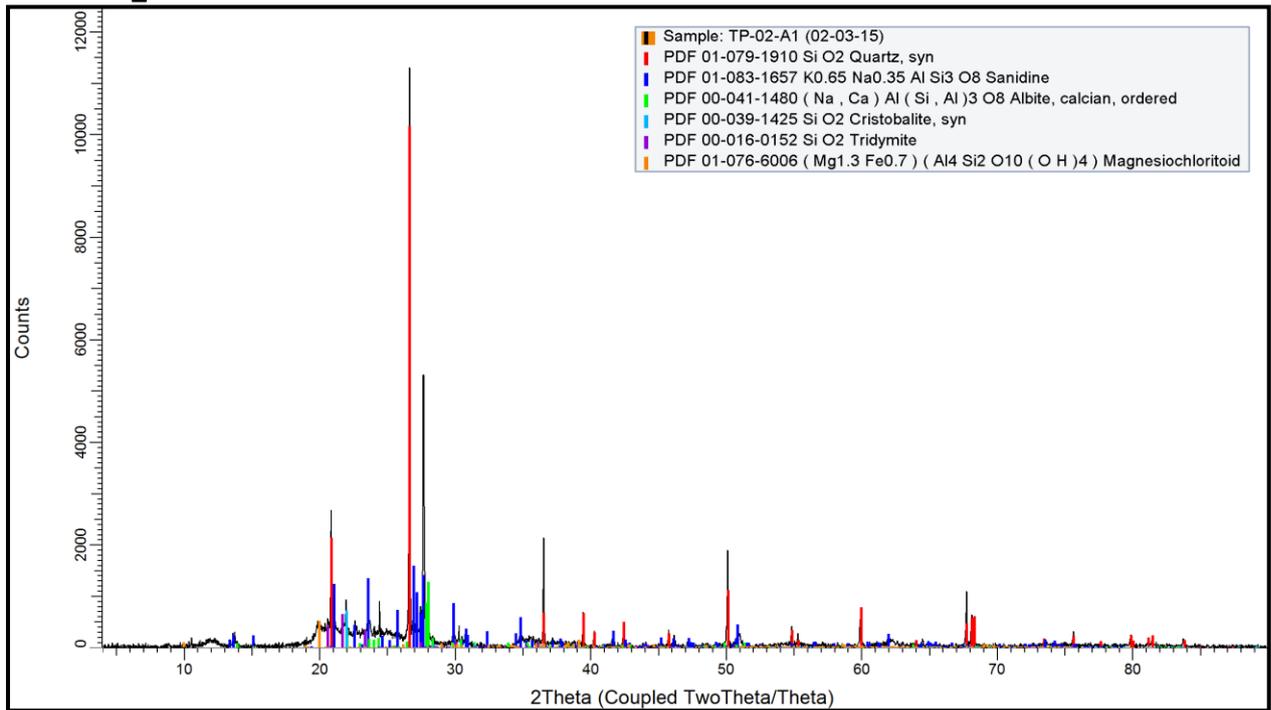


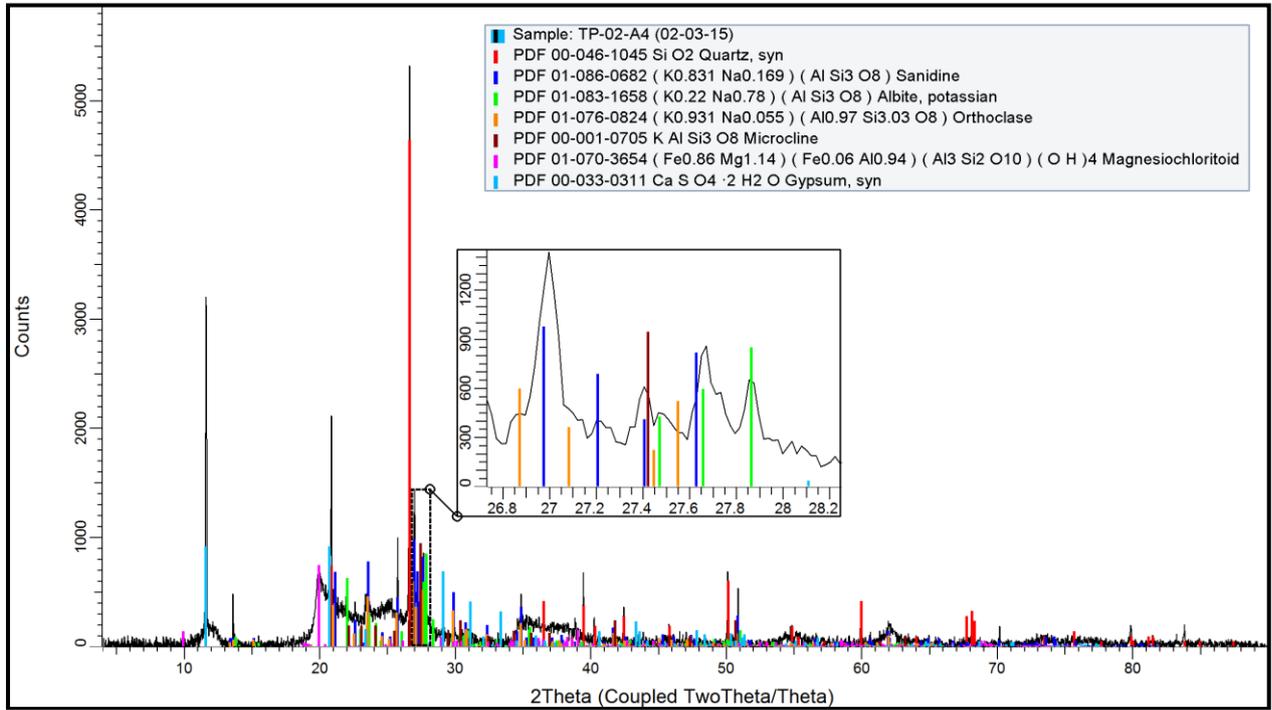
• LOTE_02: MC_02



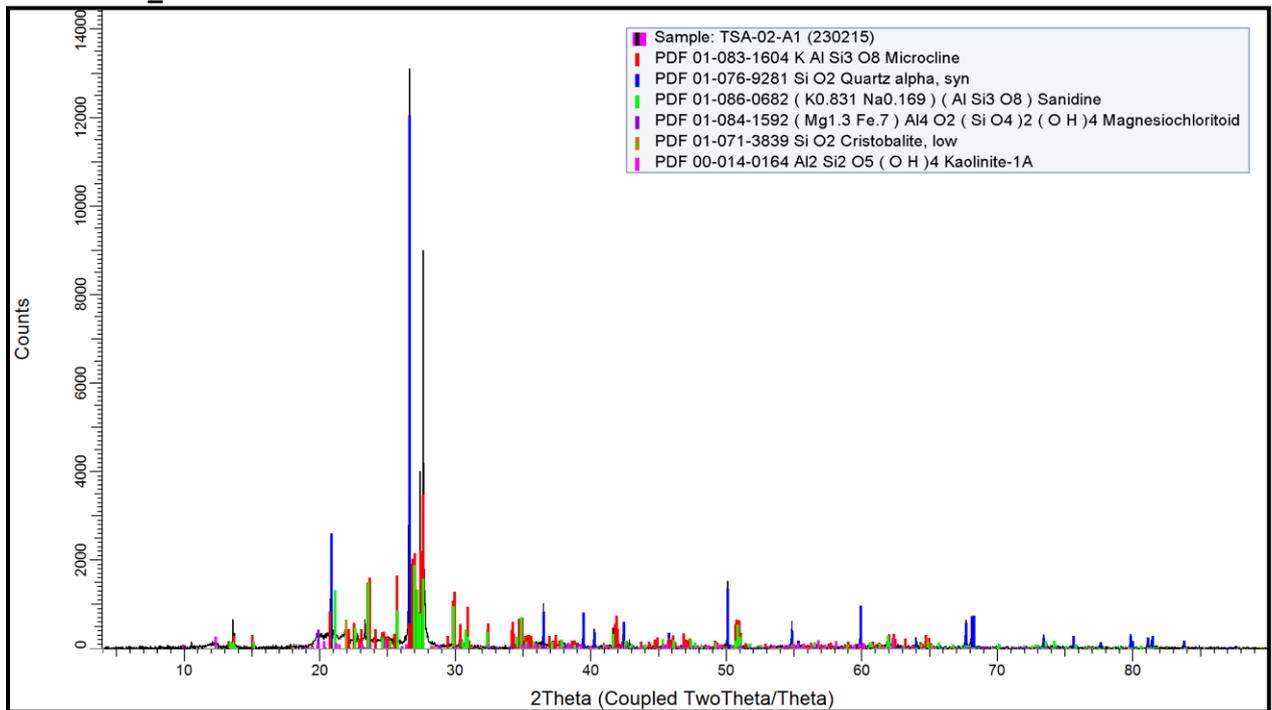


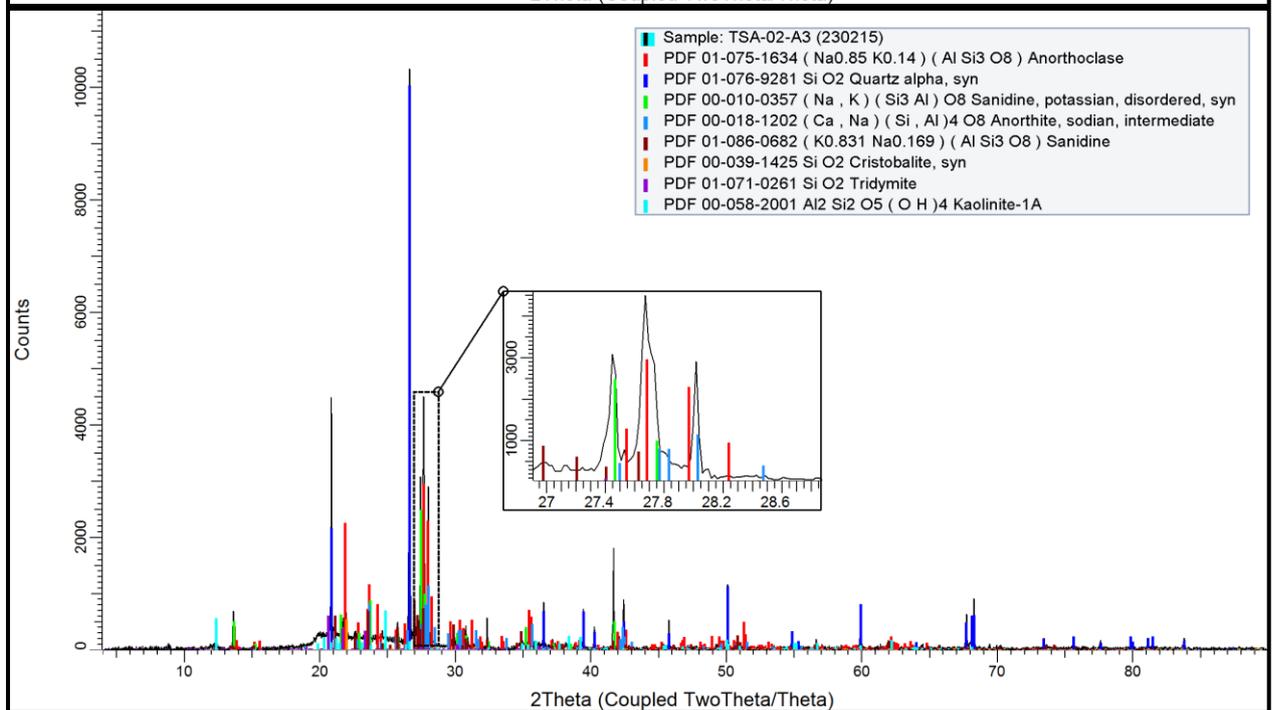
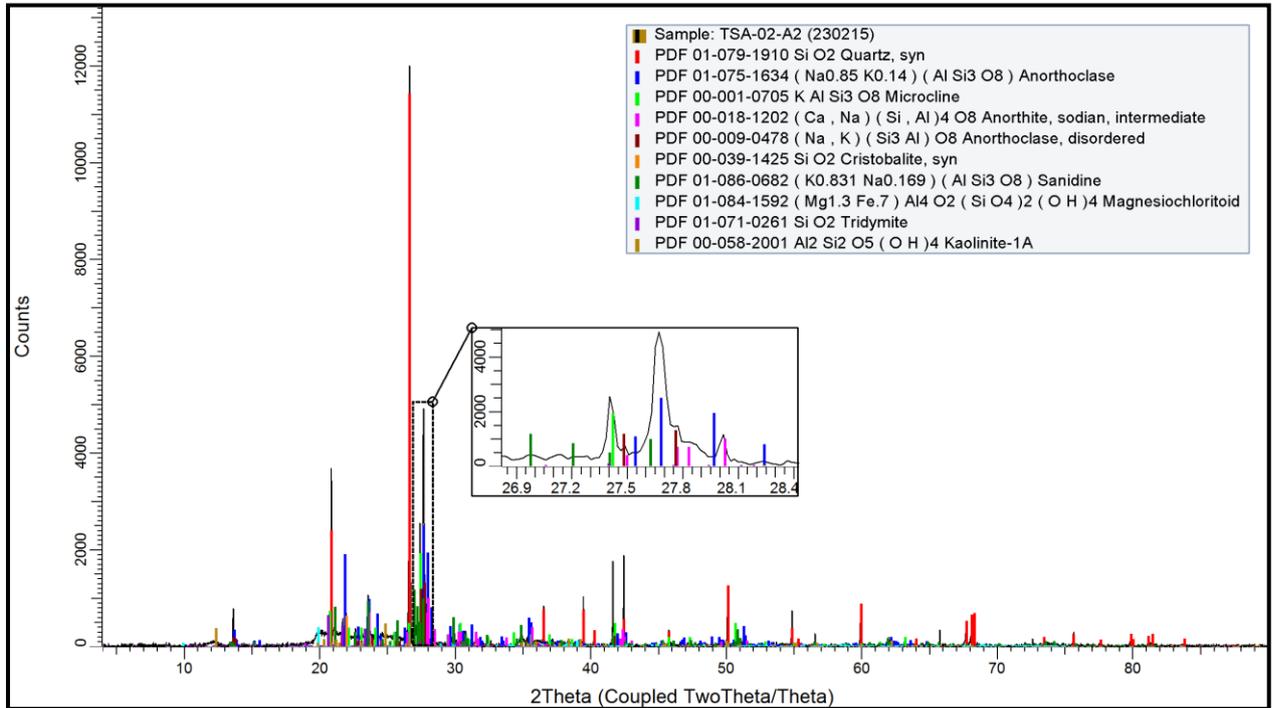
• TP_02

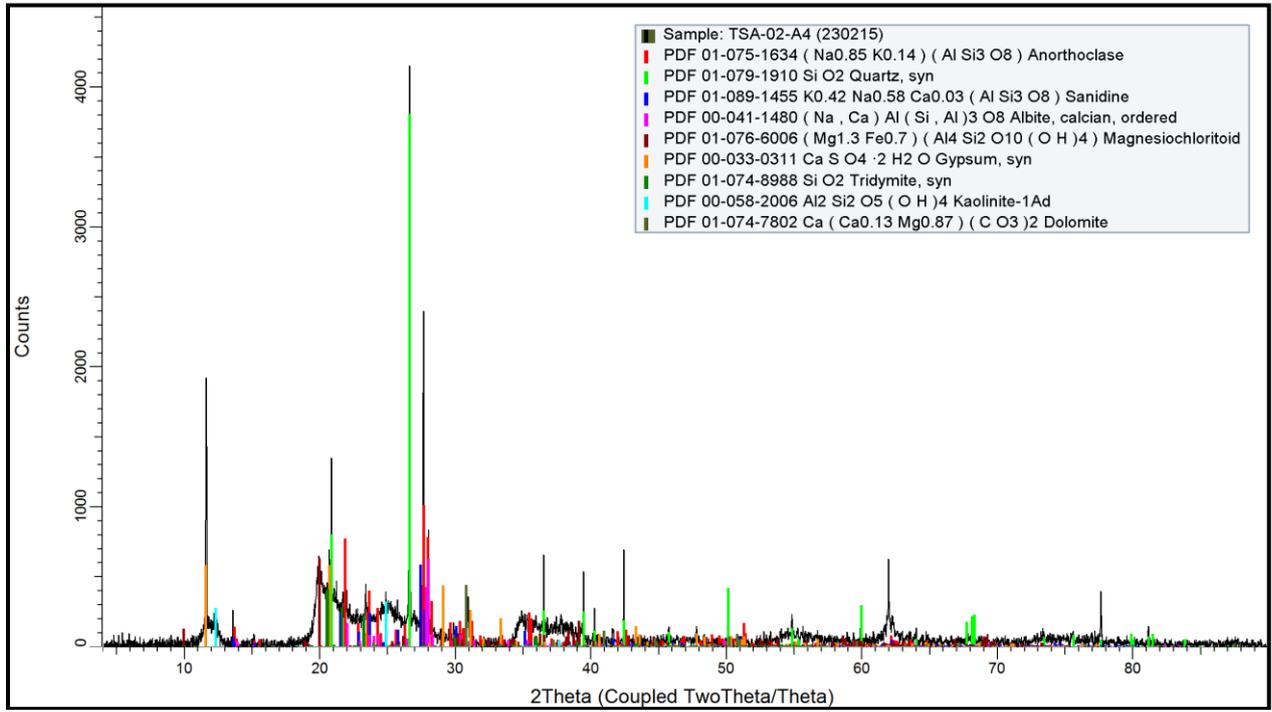




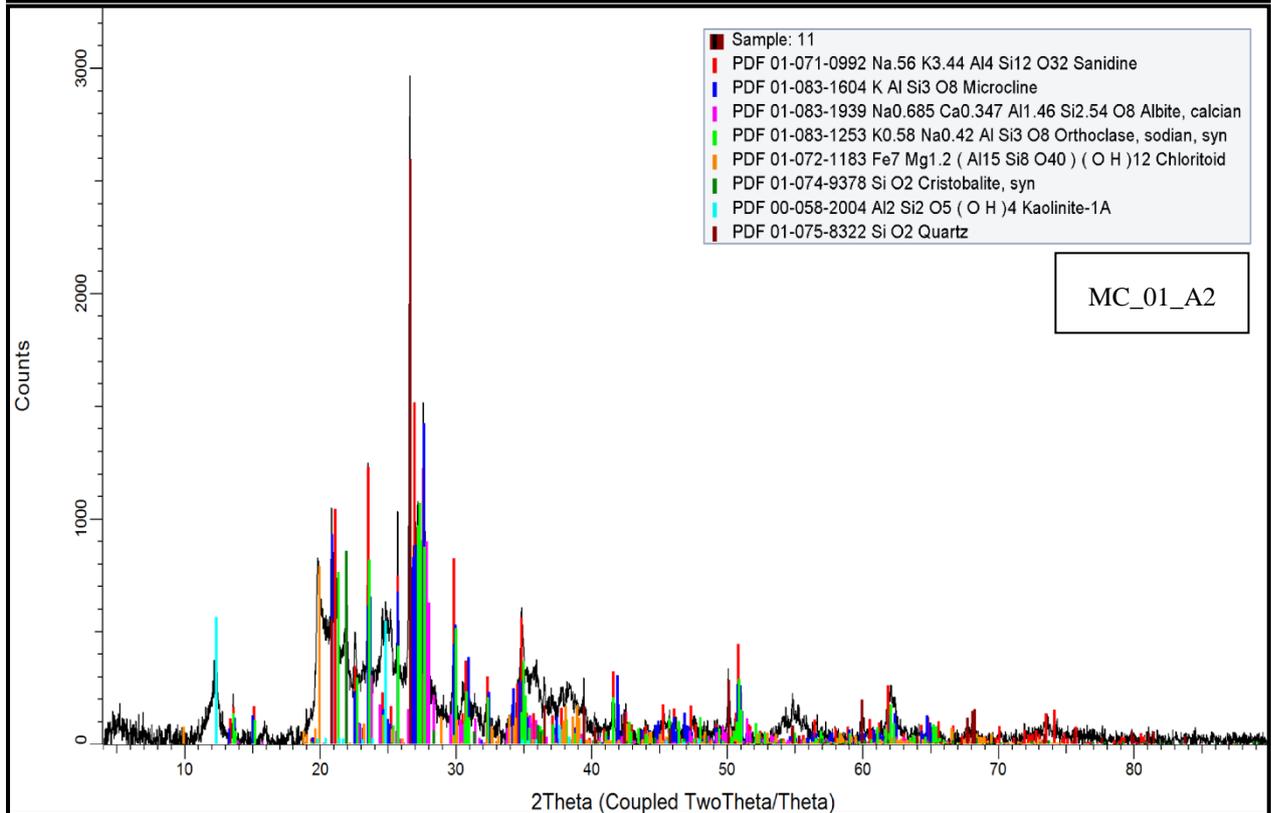
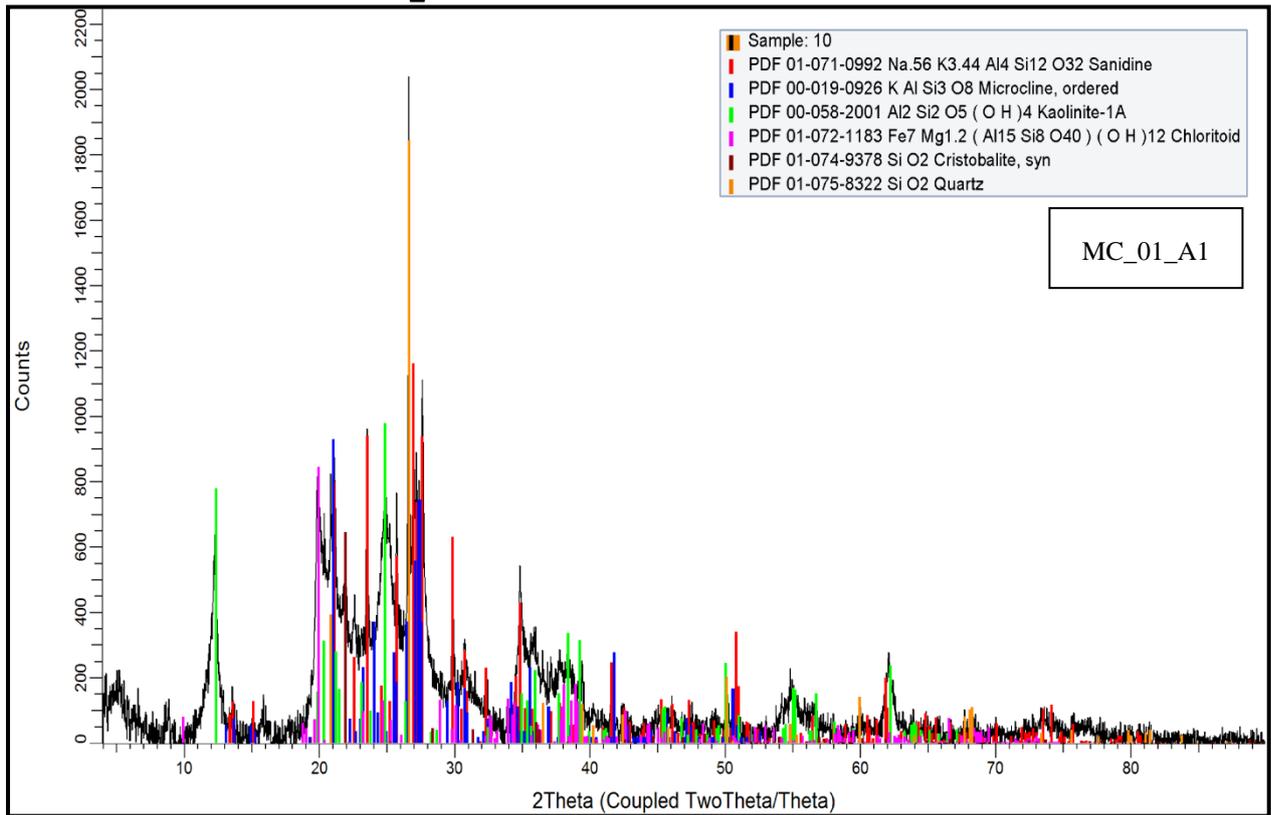
• TSA_02

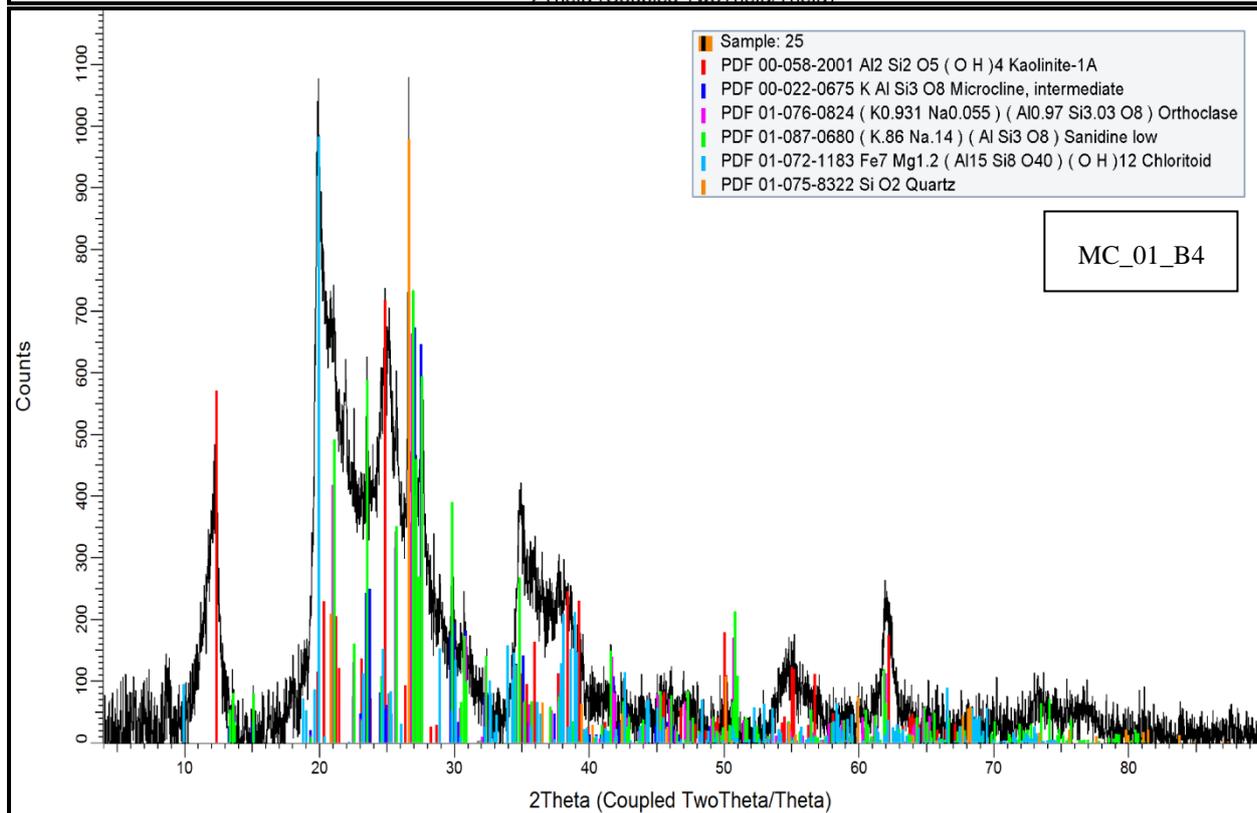
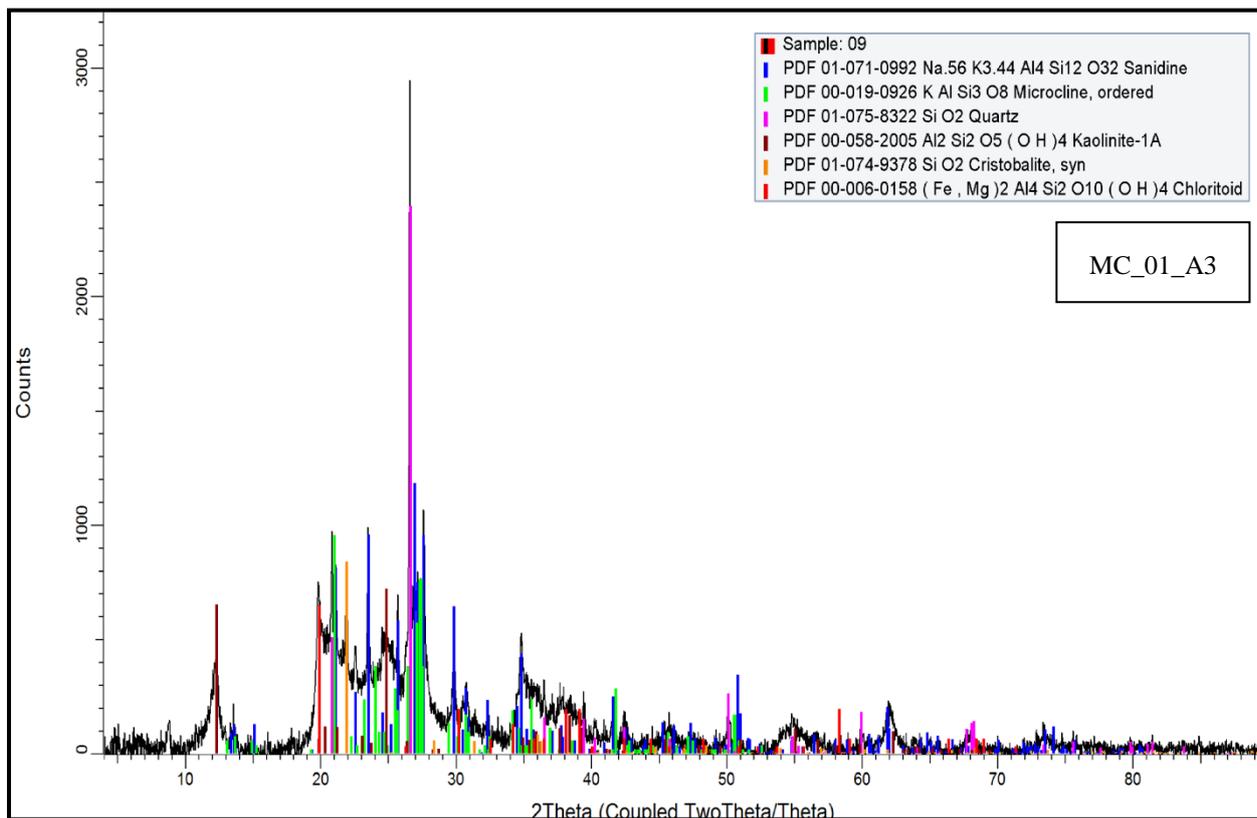


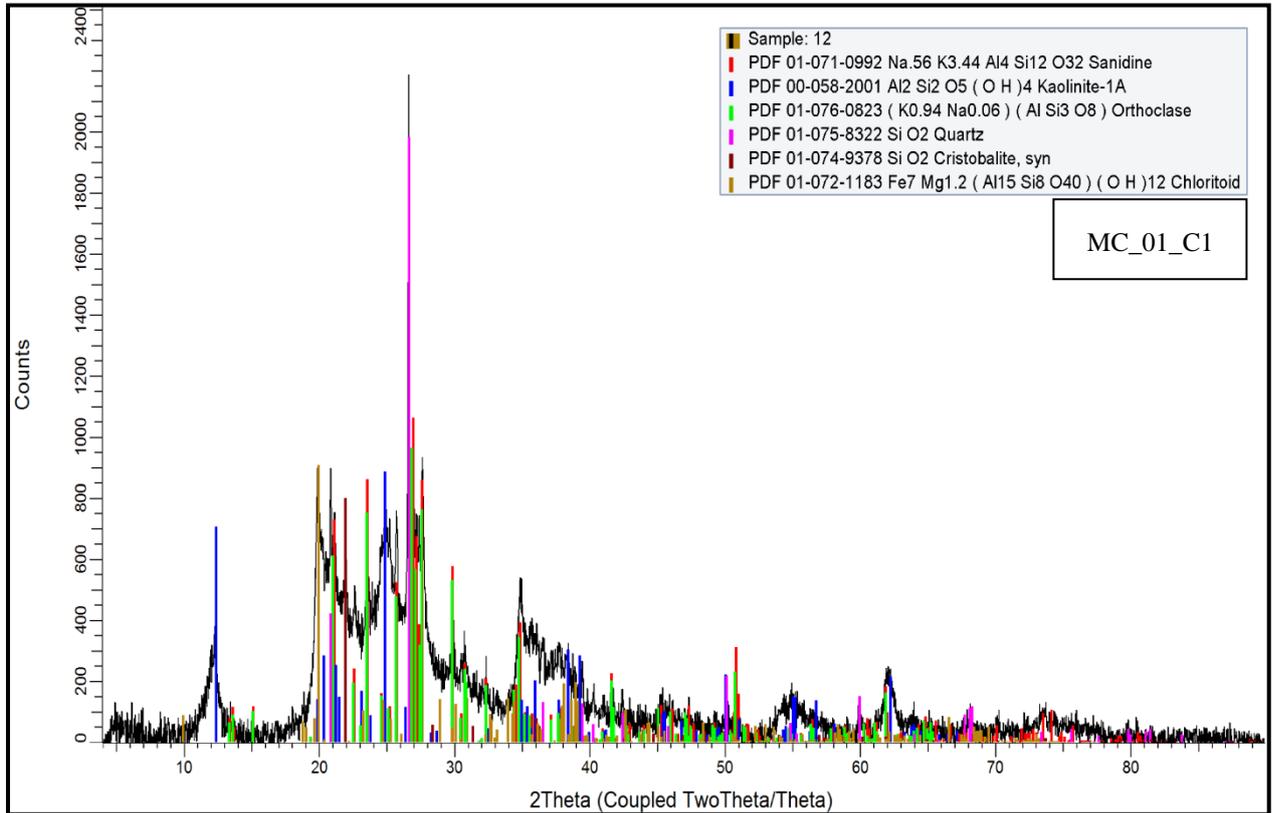




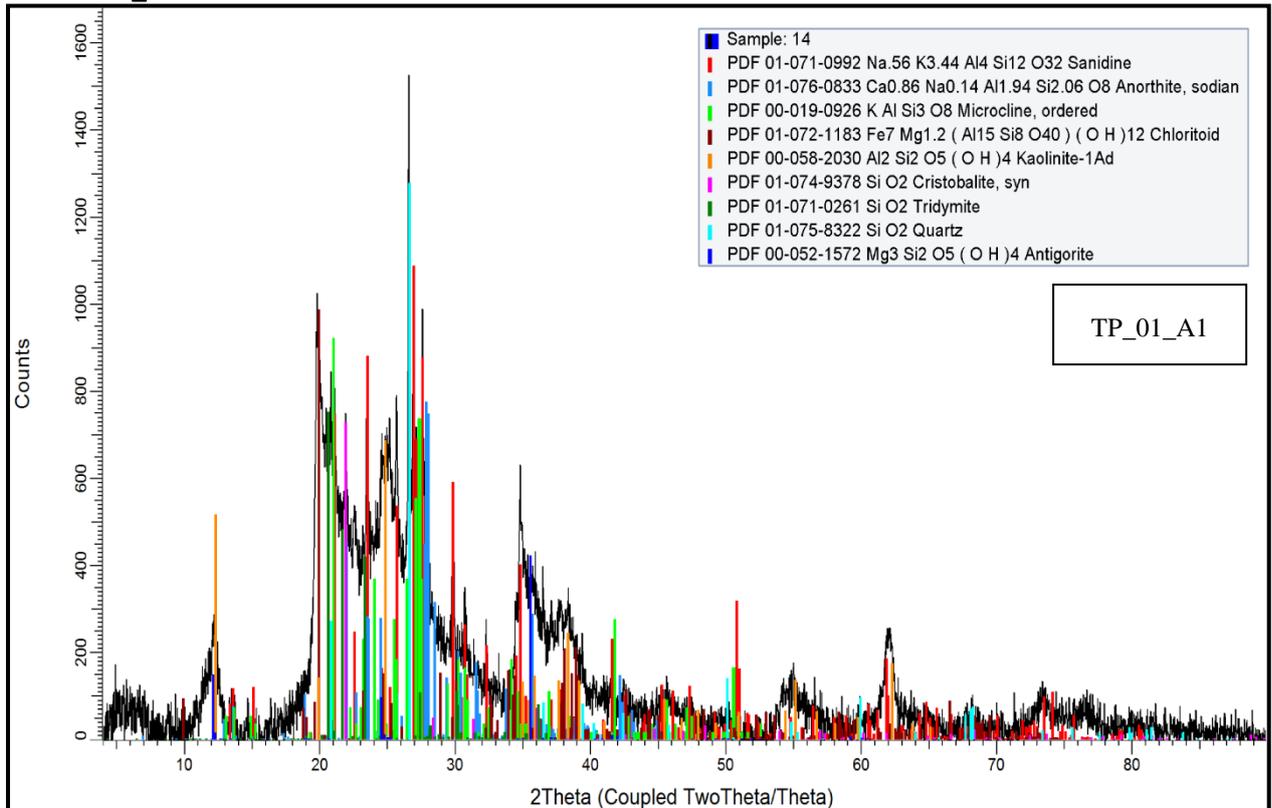
• DRX Fracción arcillas: MC_01

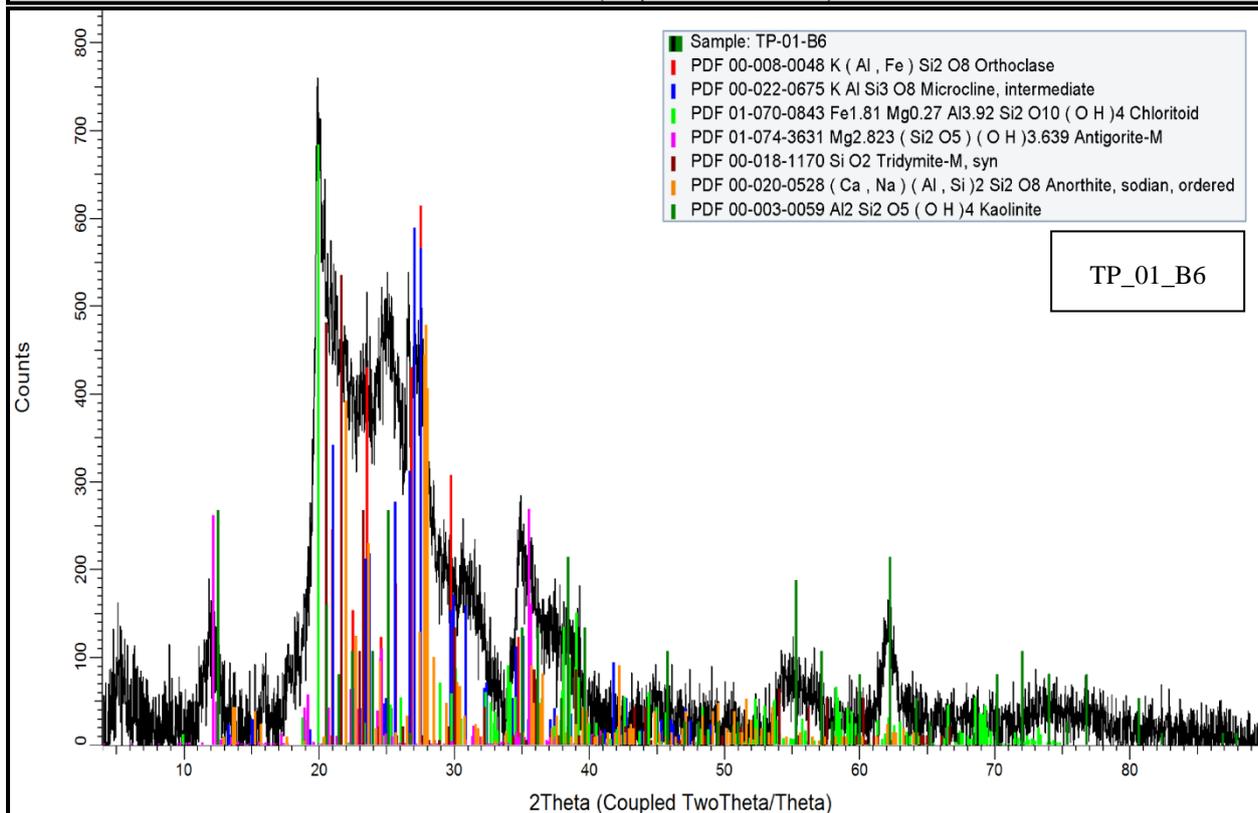
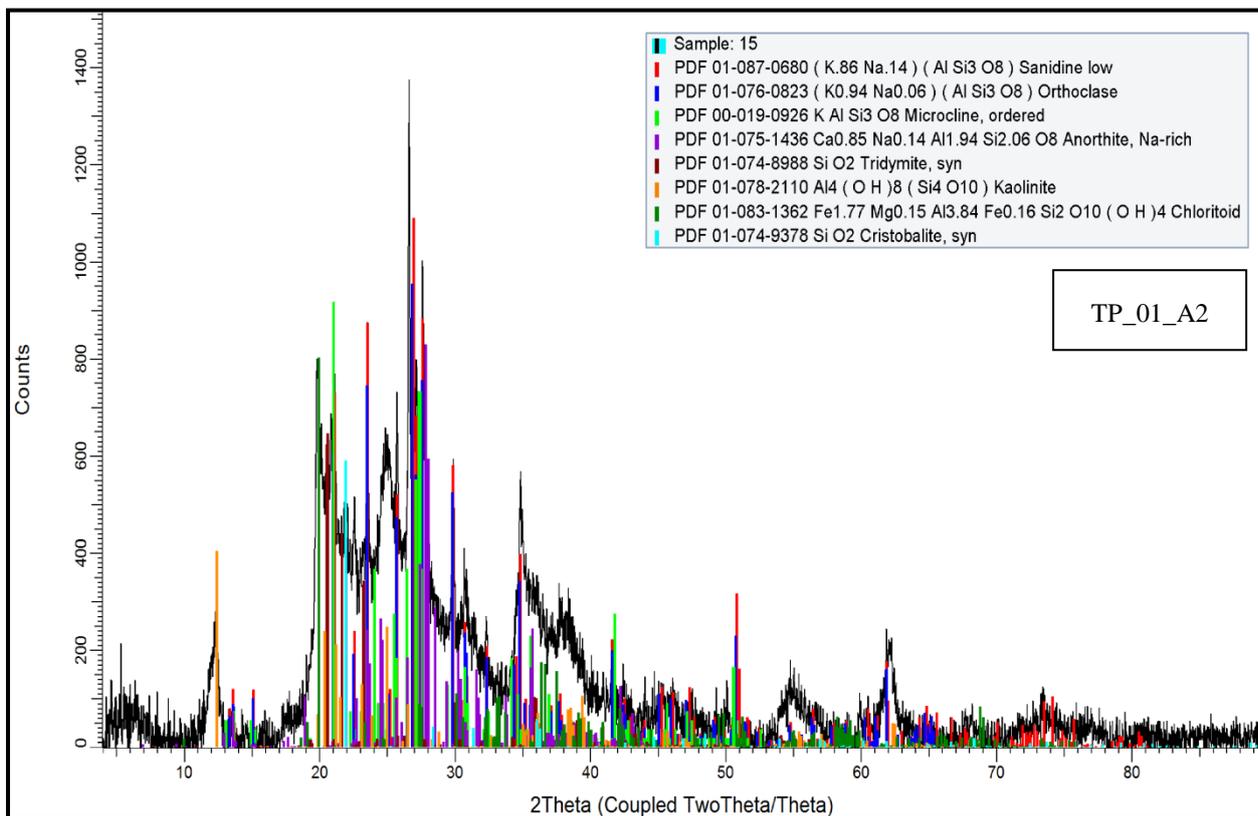


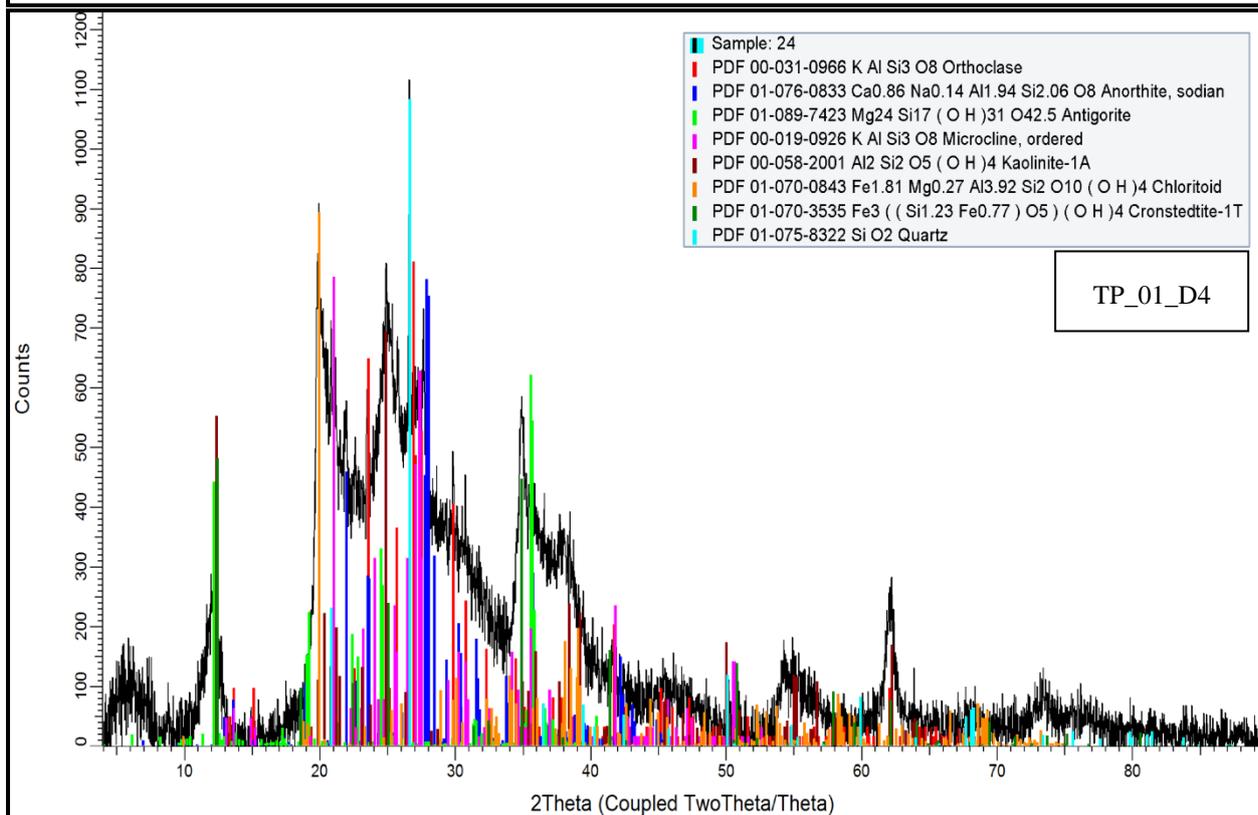
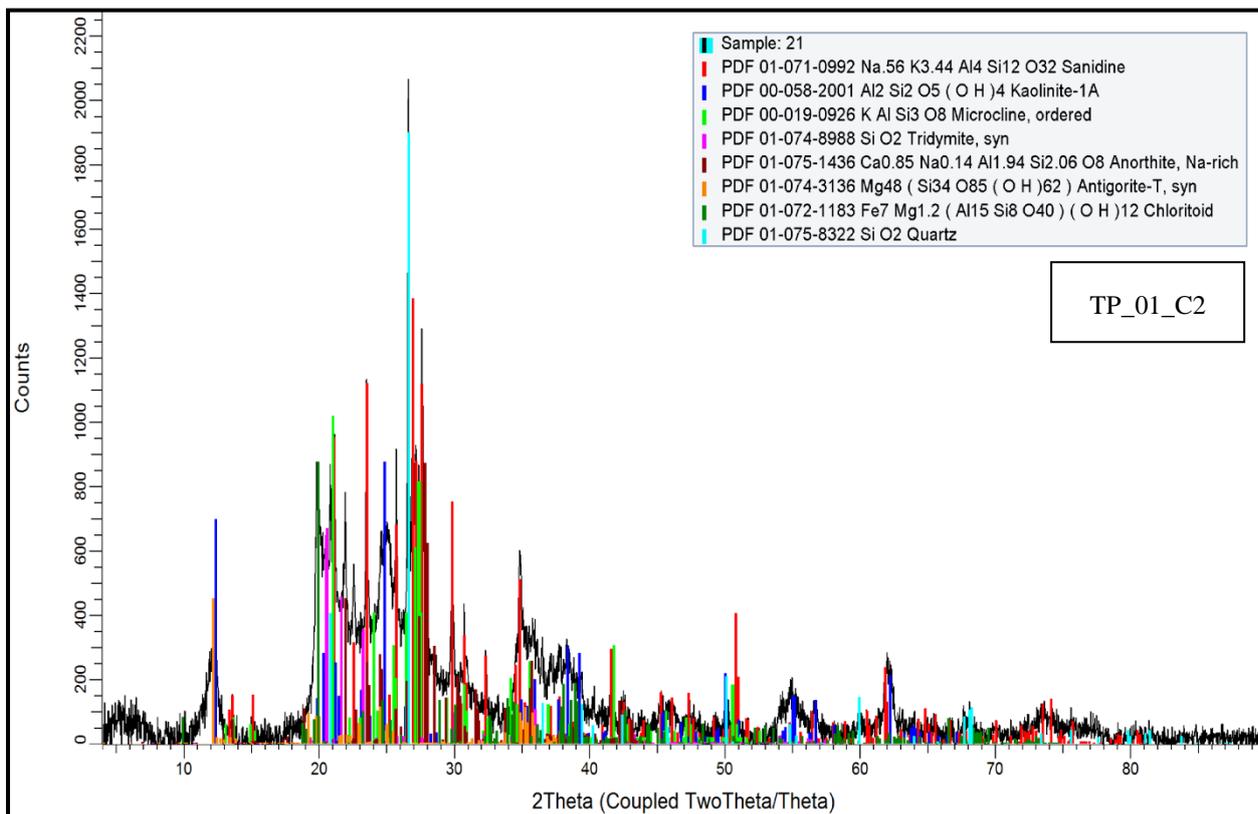




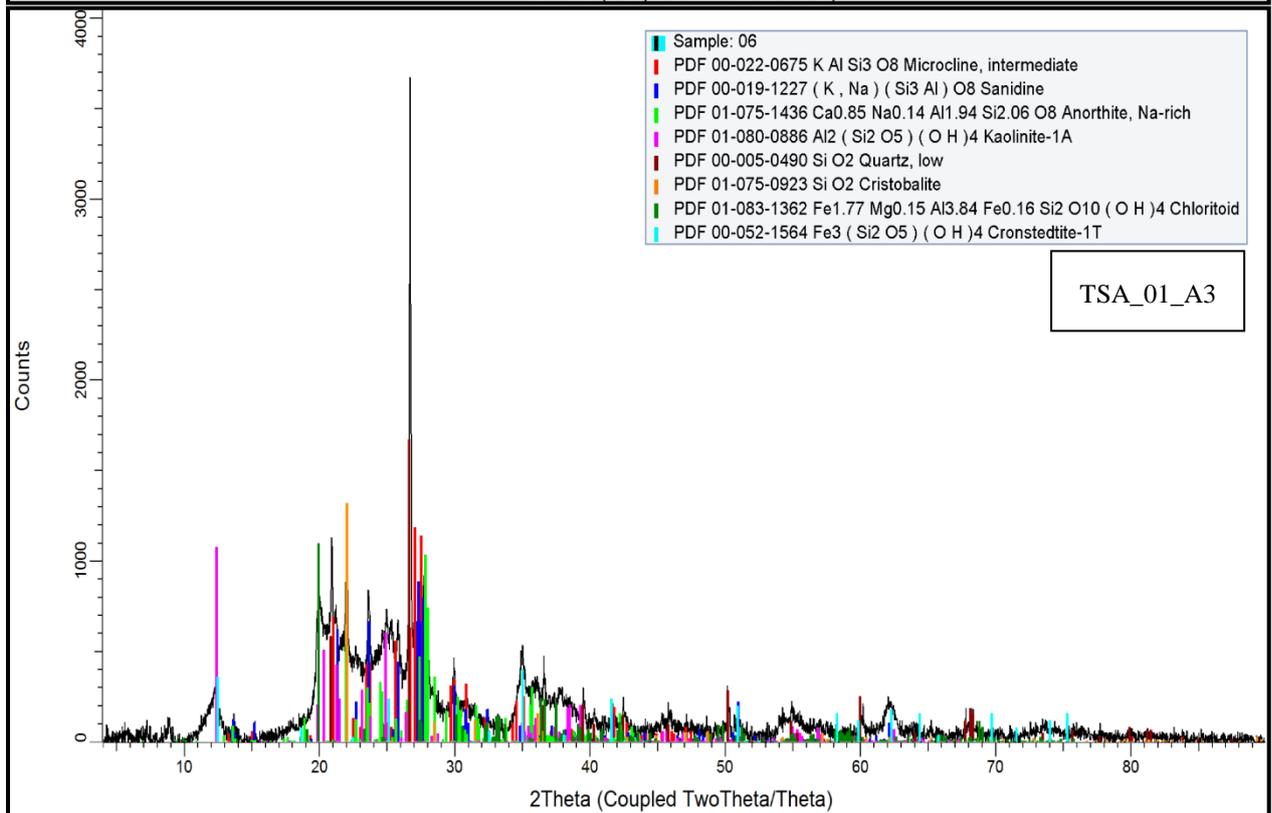
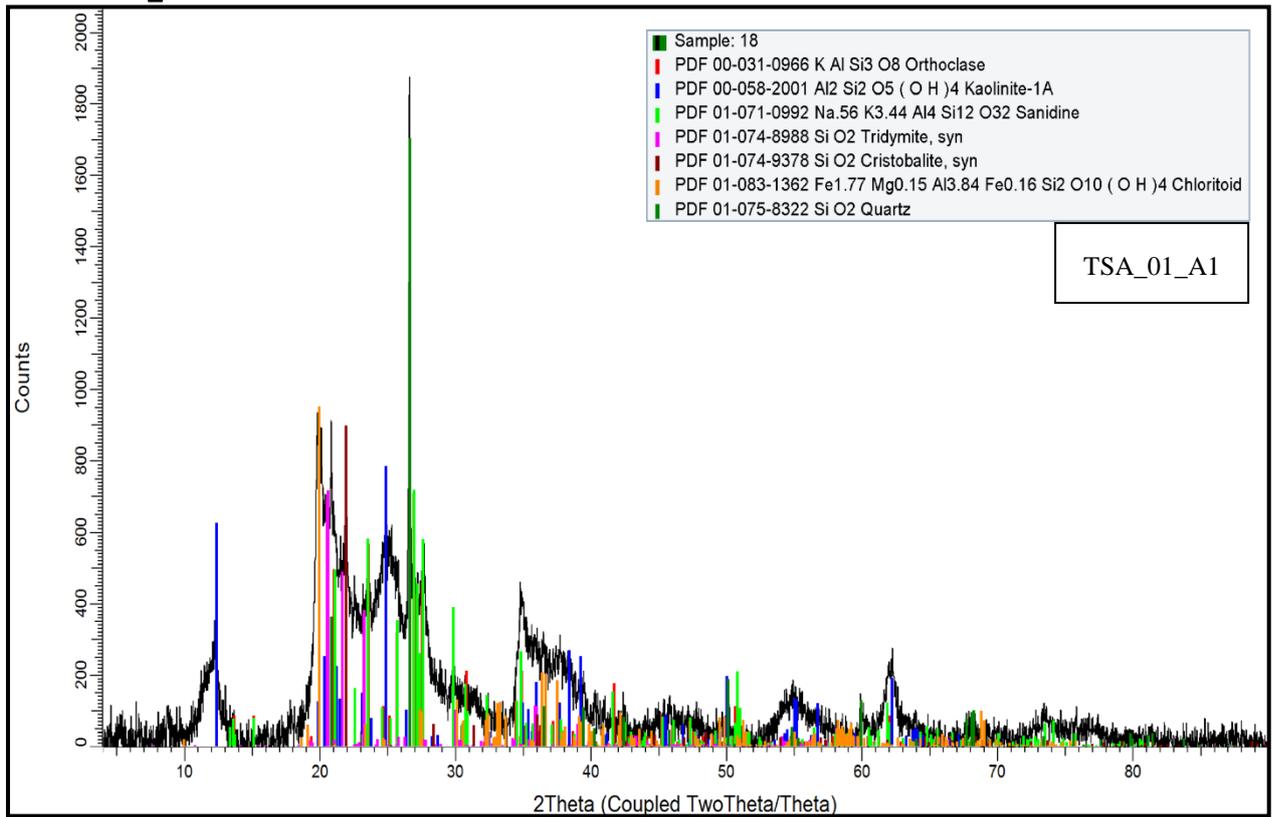
• TP_01

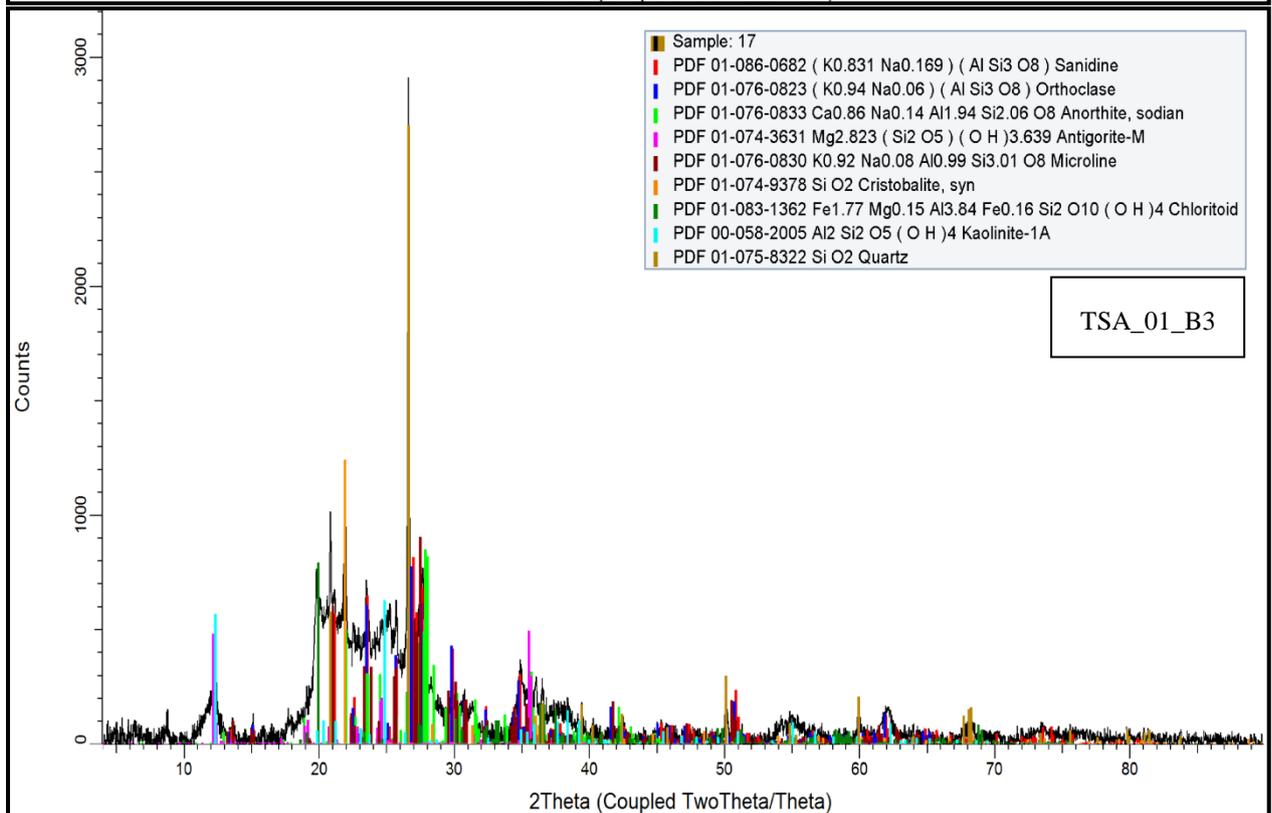
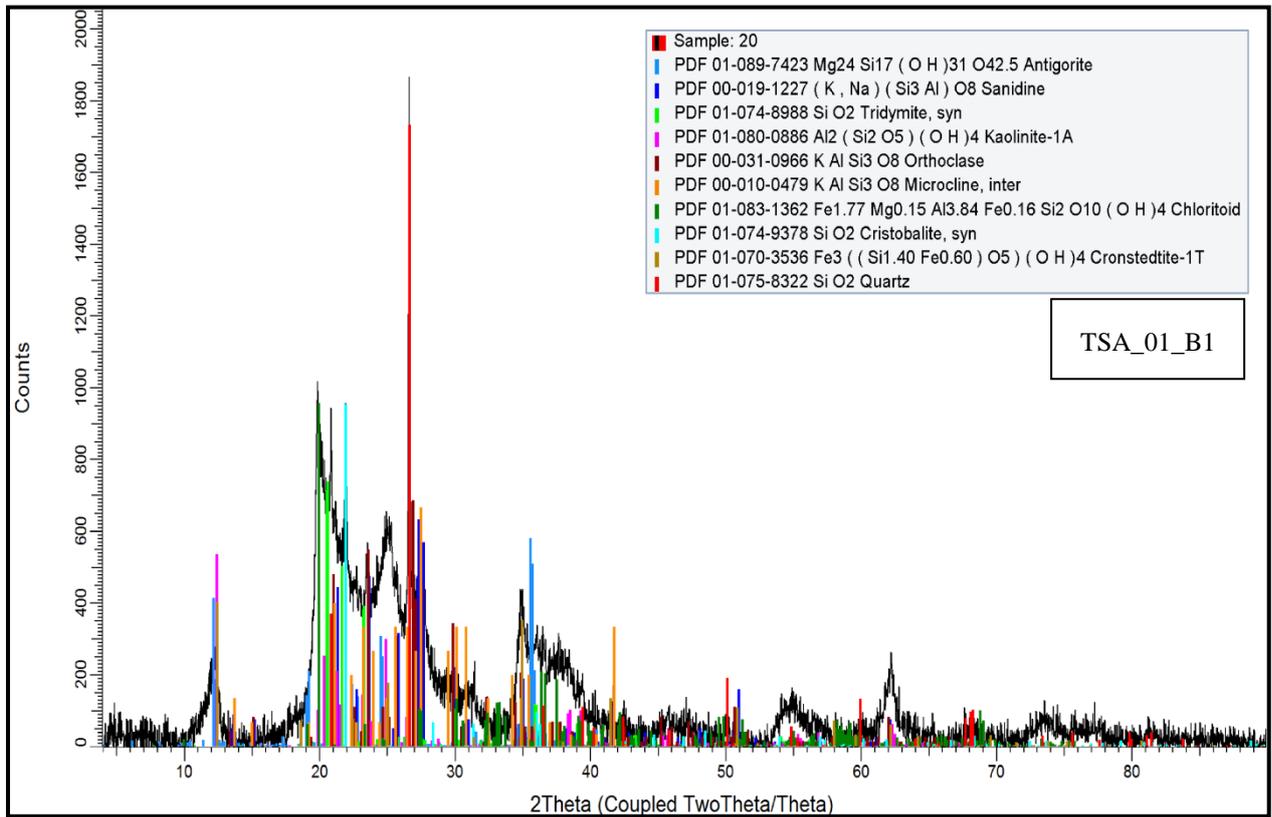


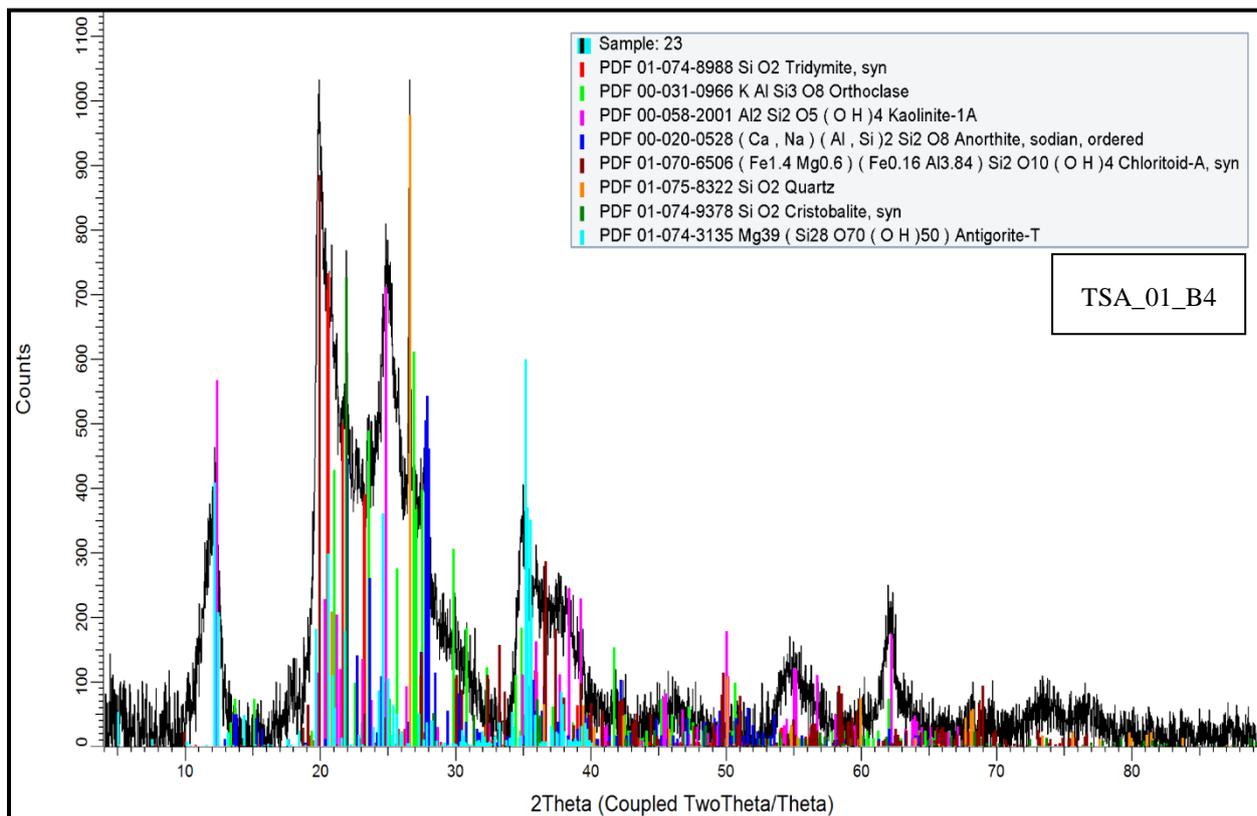




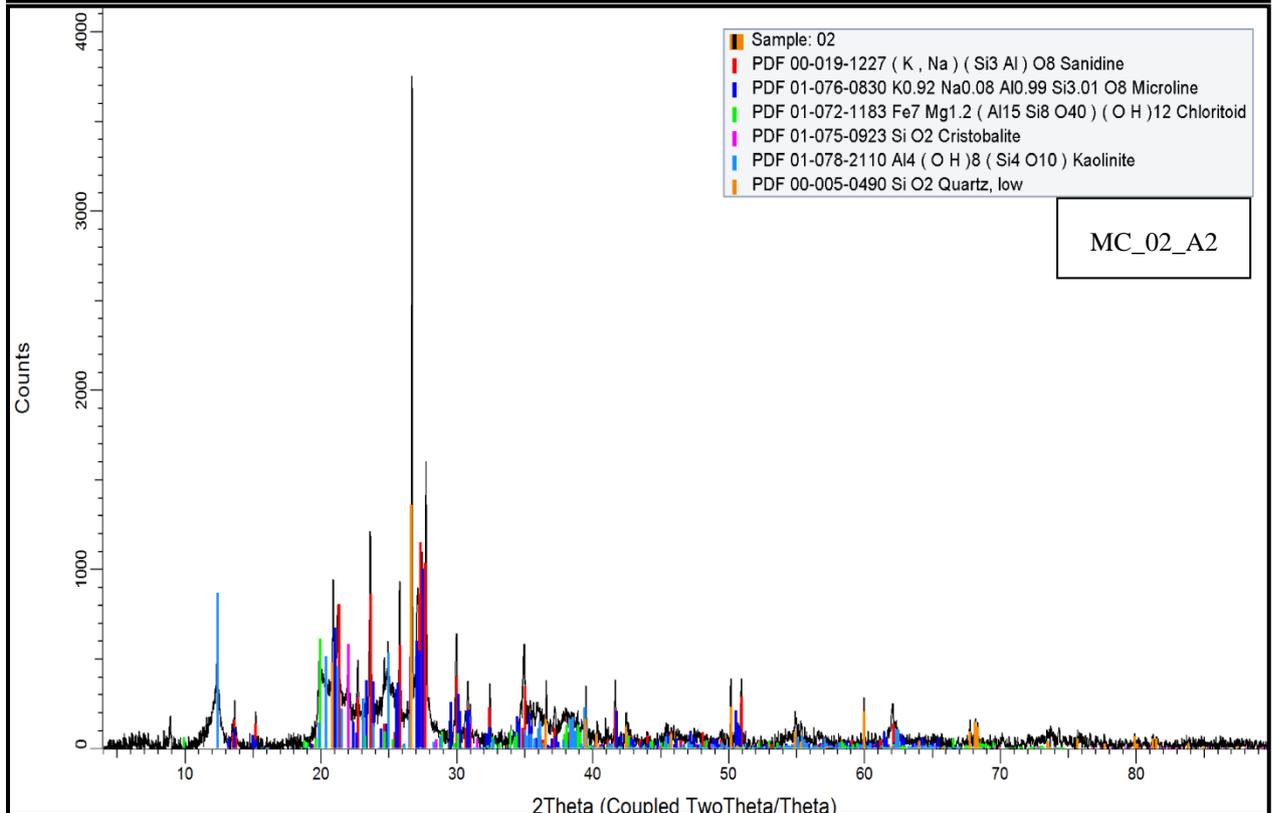
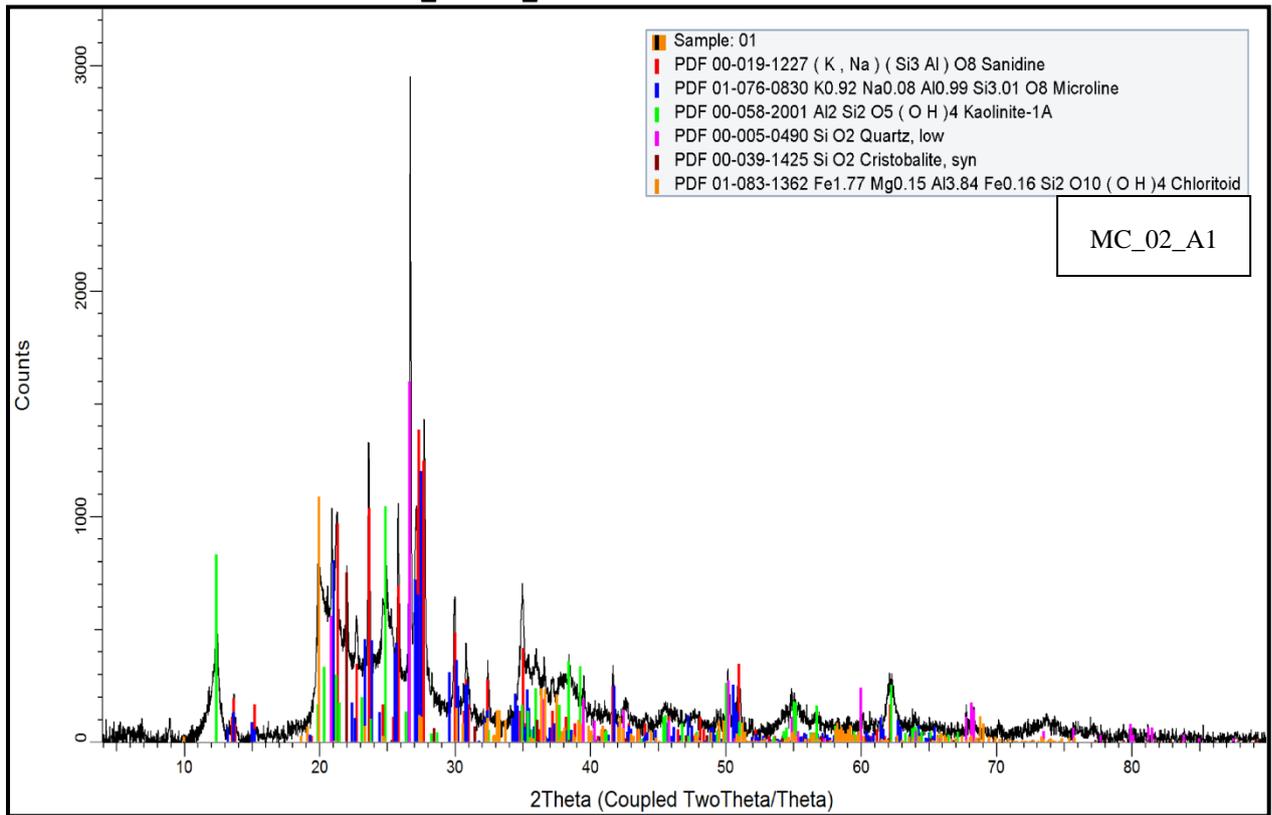
• TSA_01

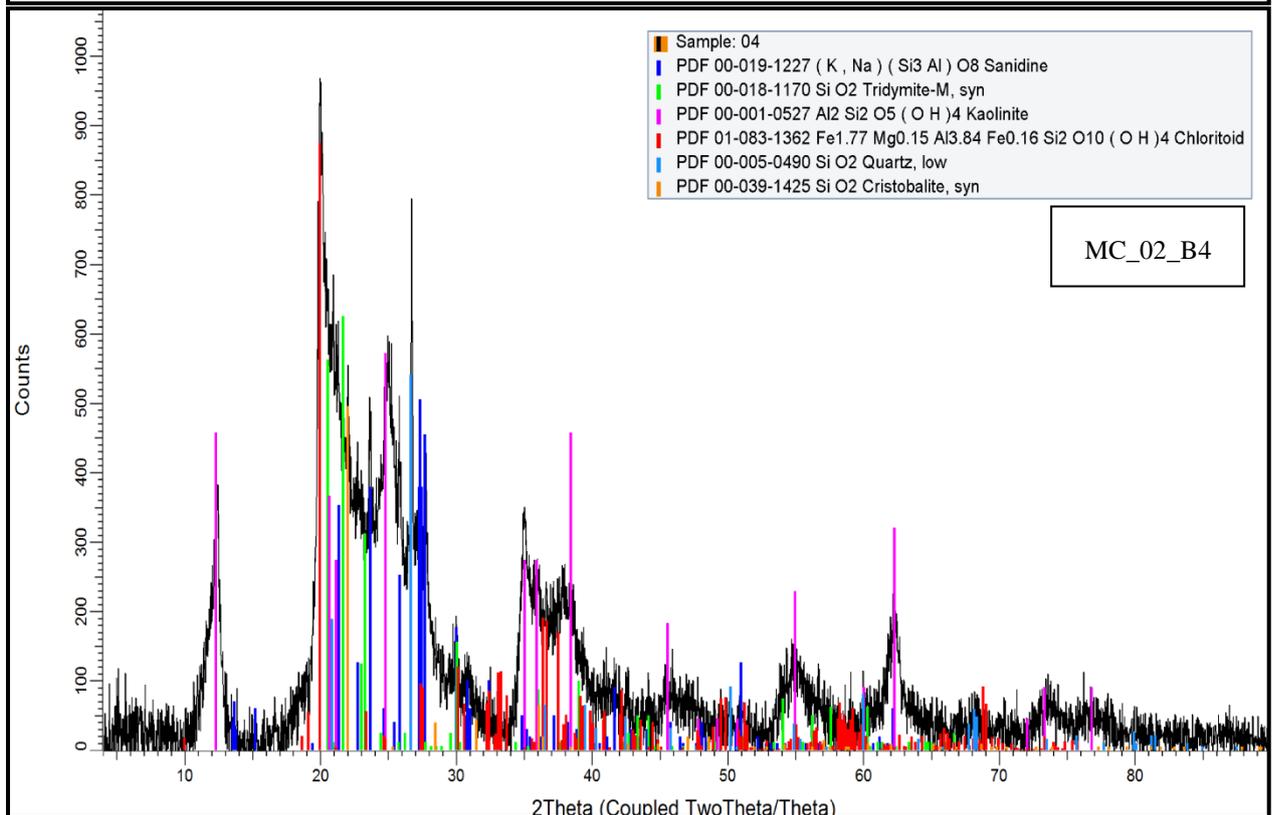
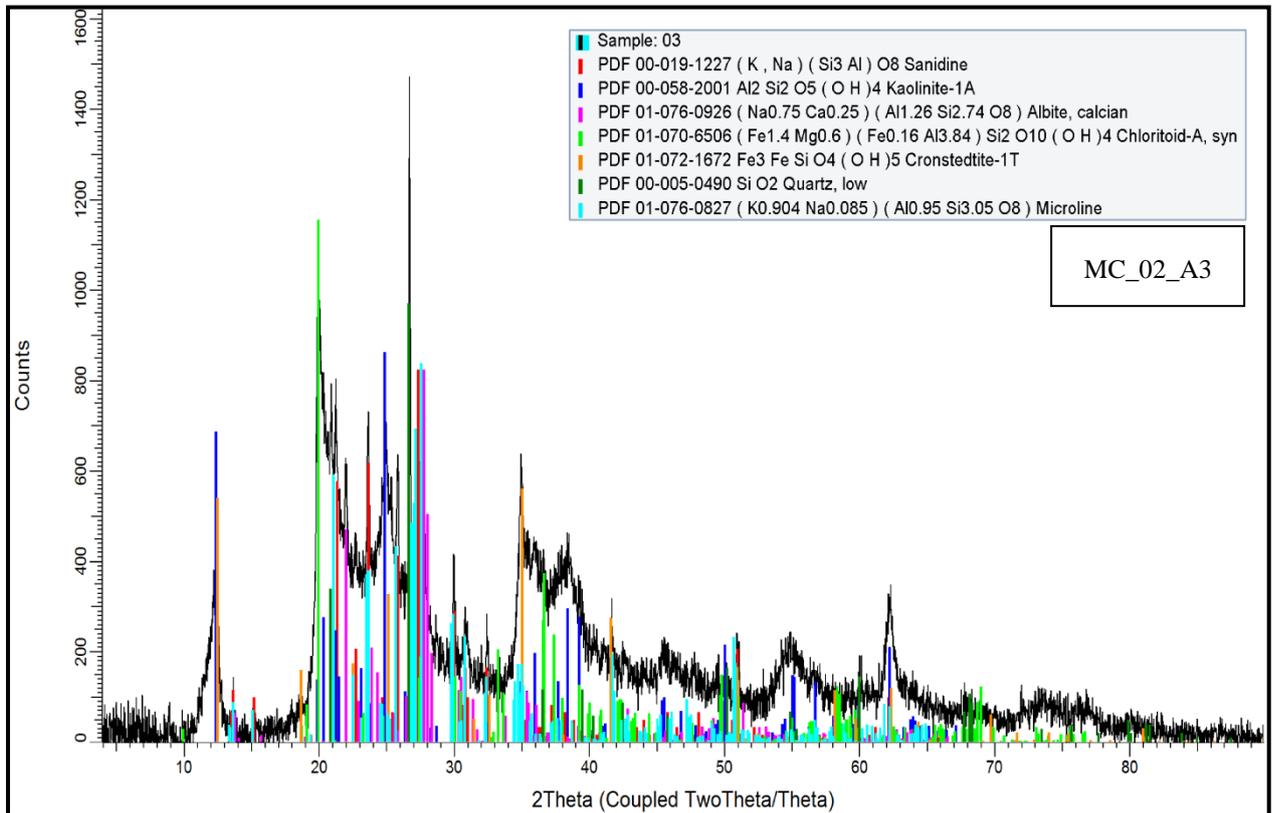




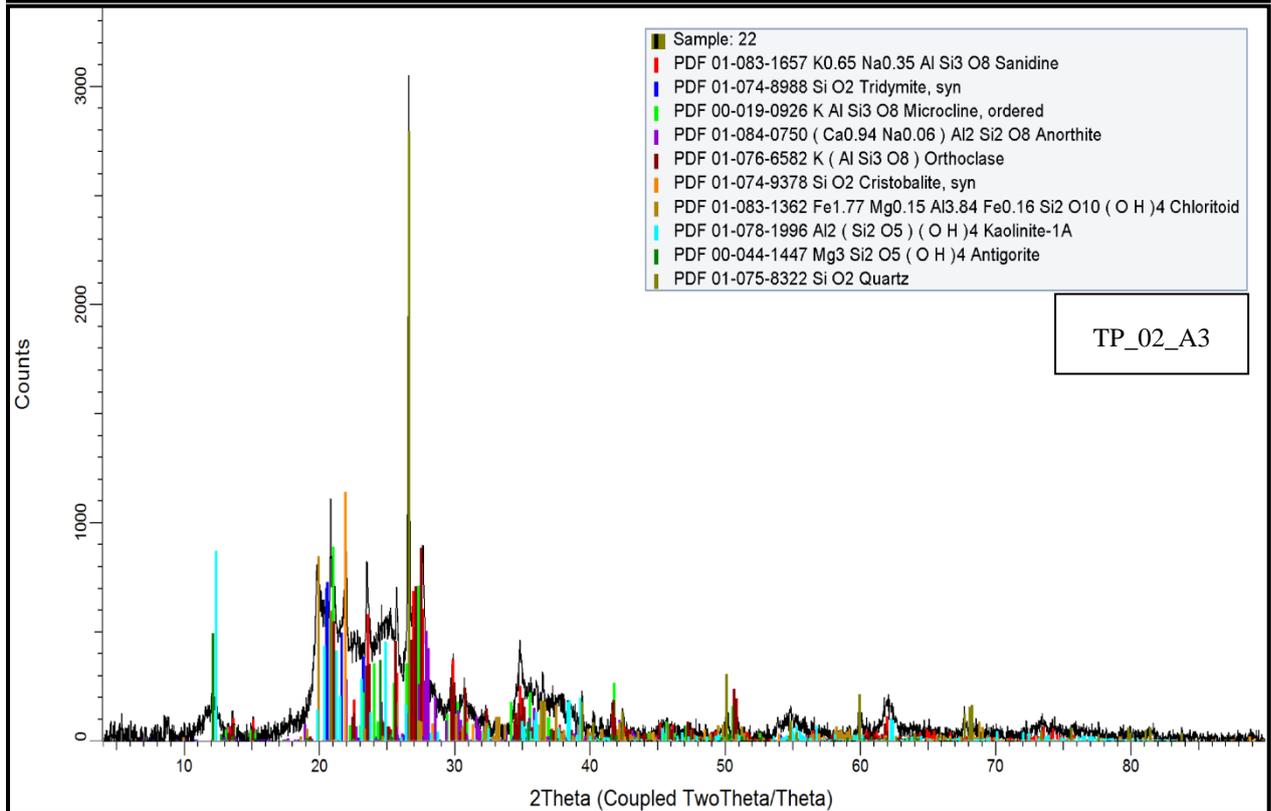
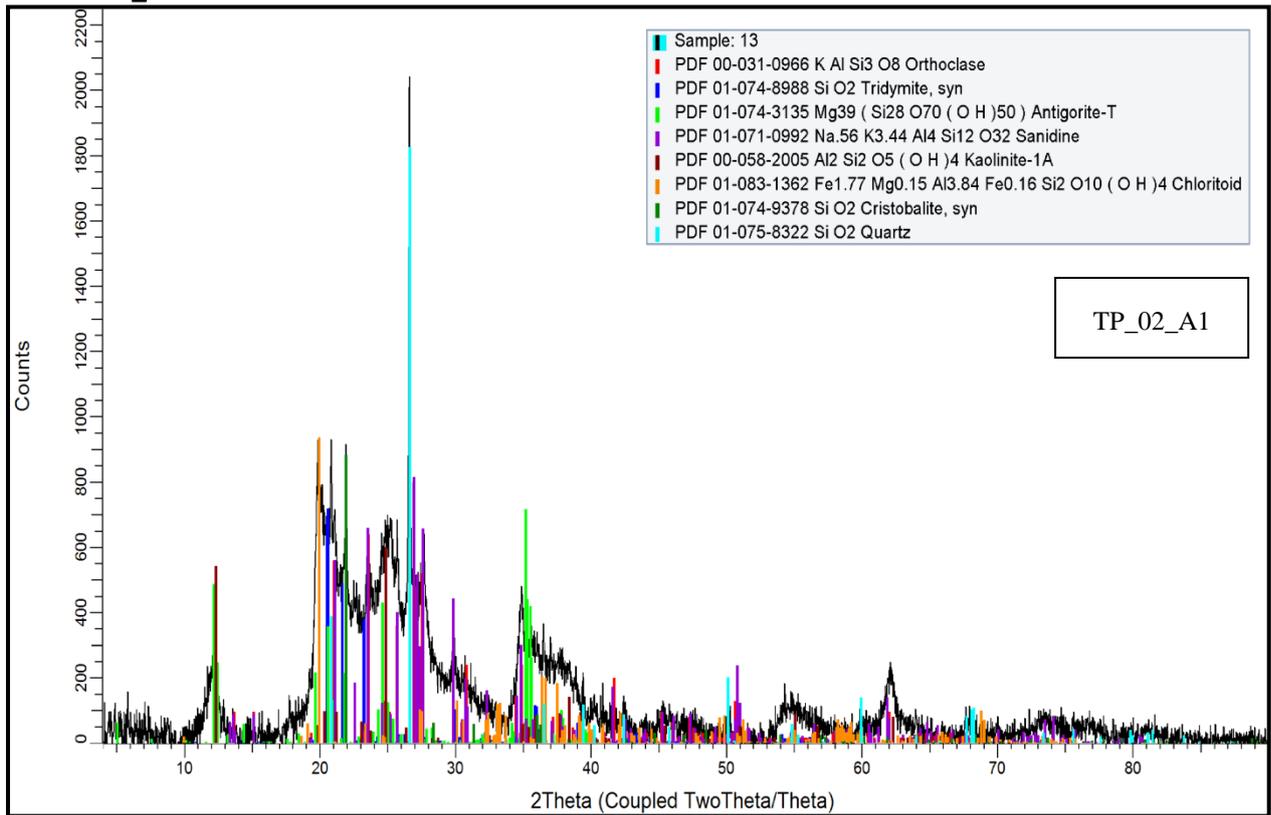


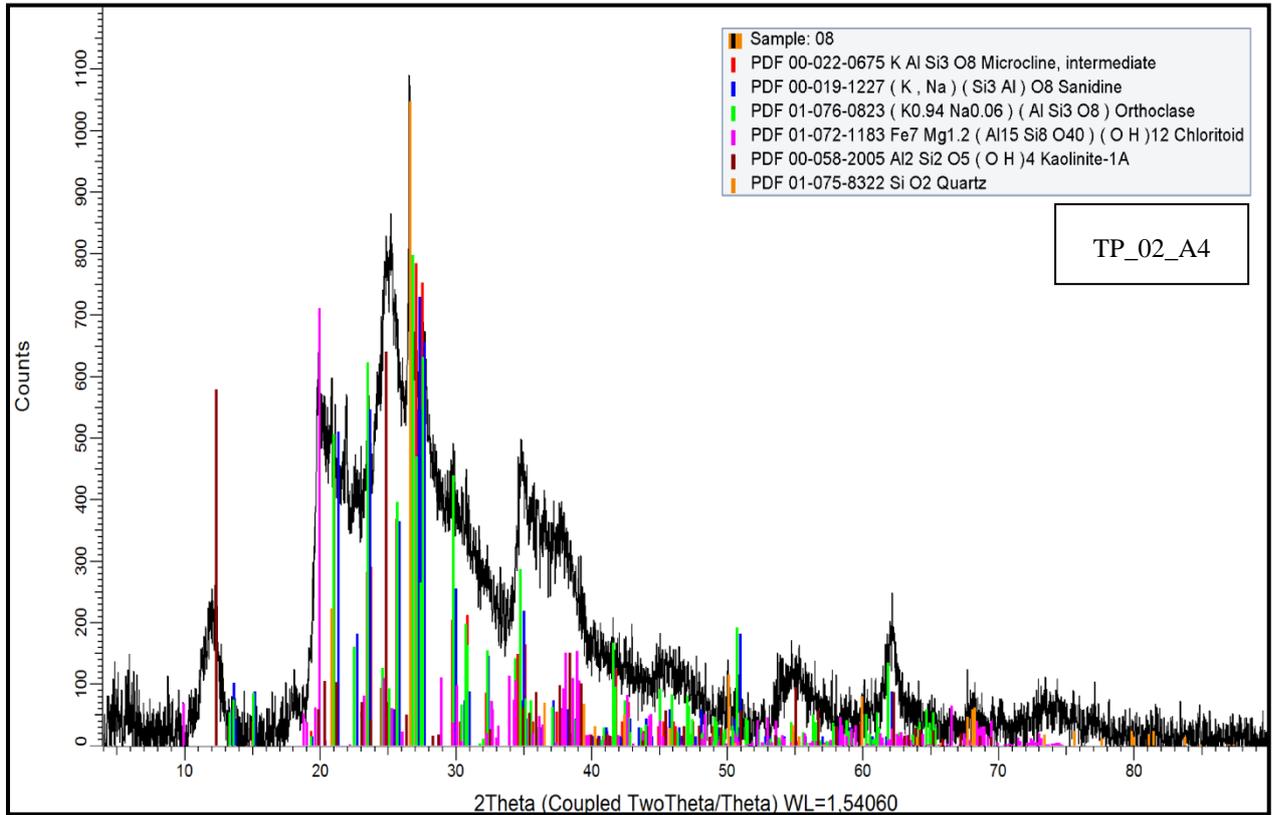
• DRX Fracción arcillas LOTE_02: MC_02



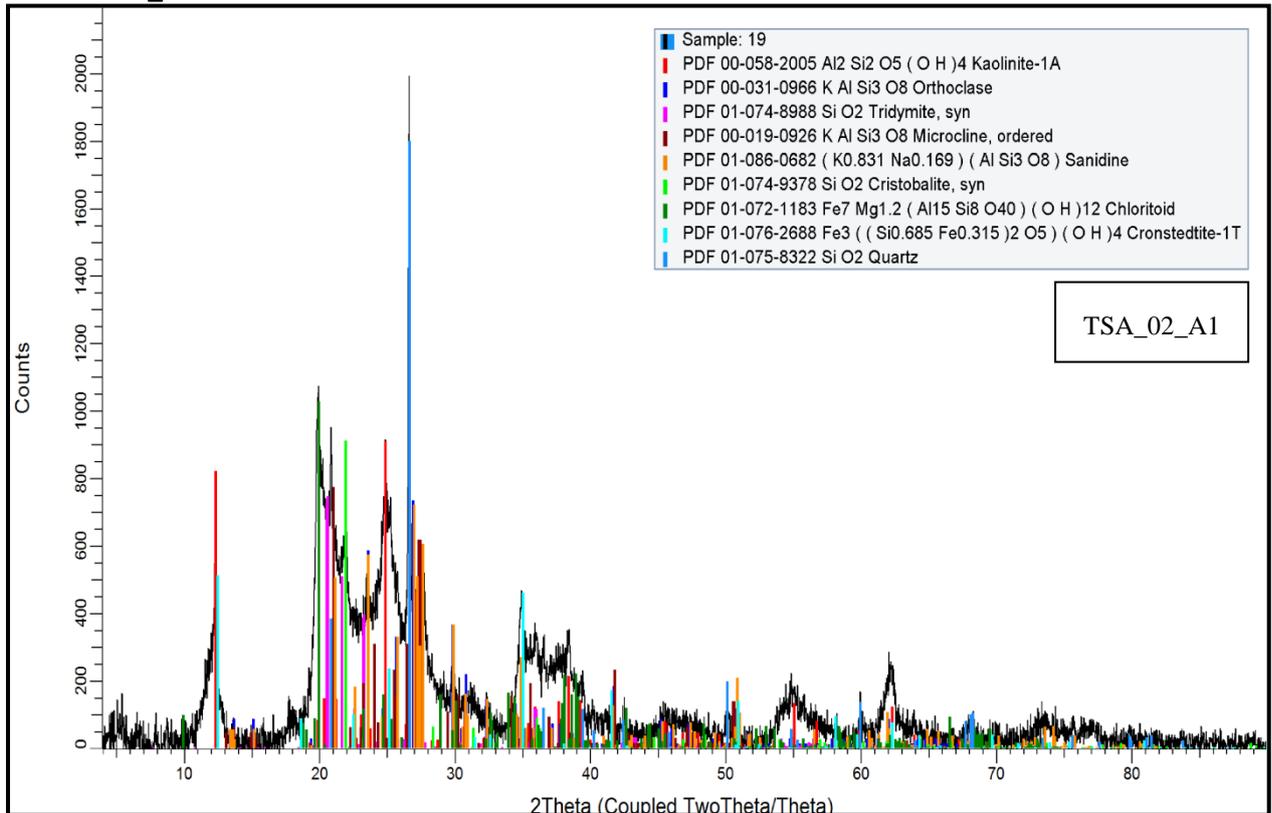


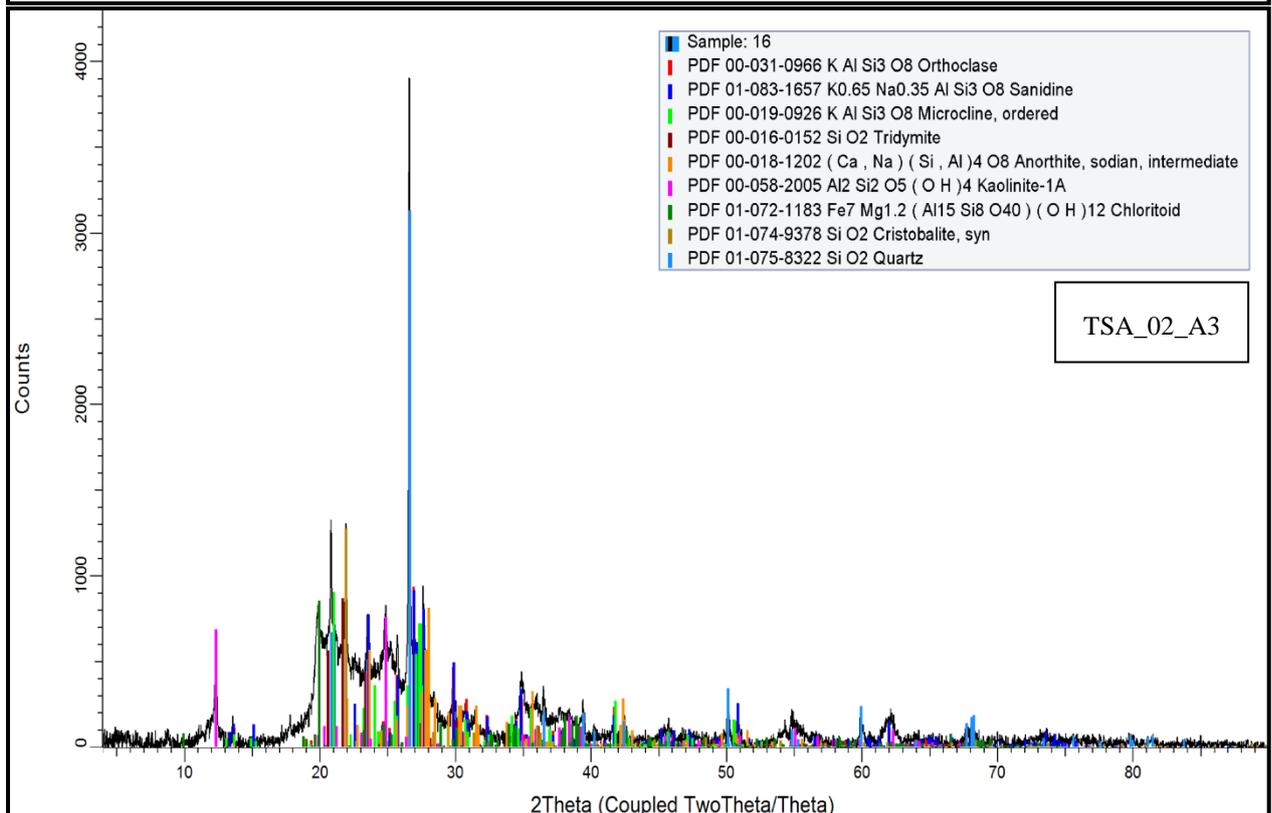
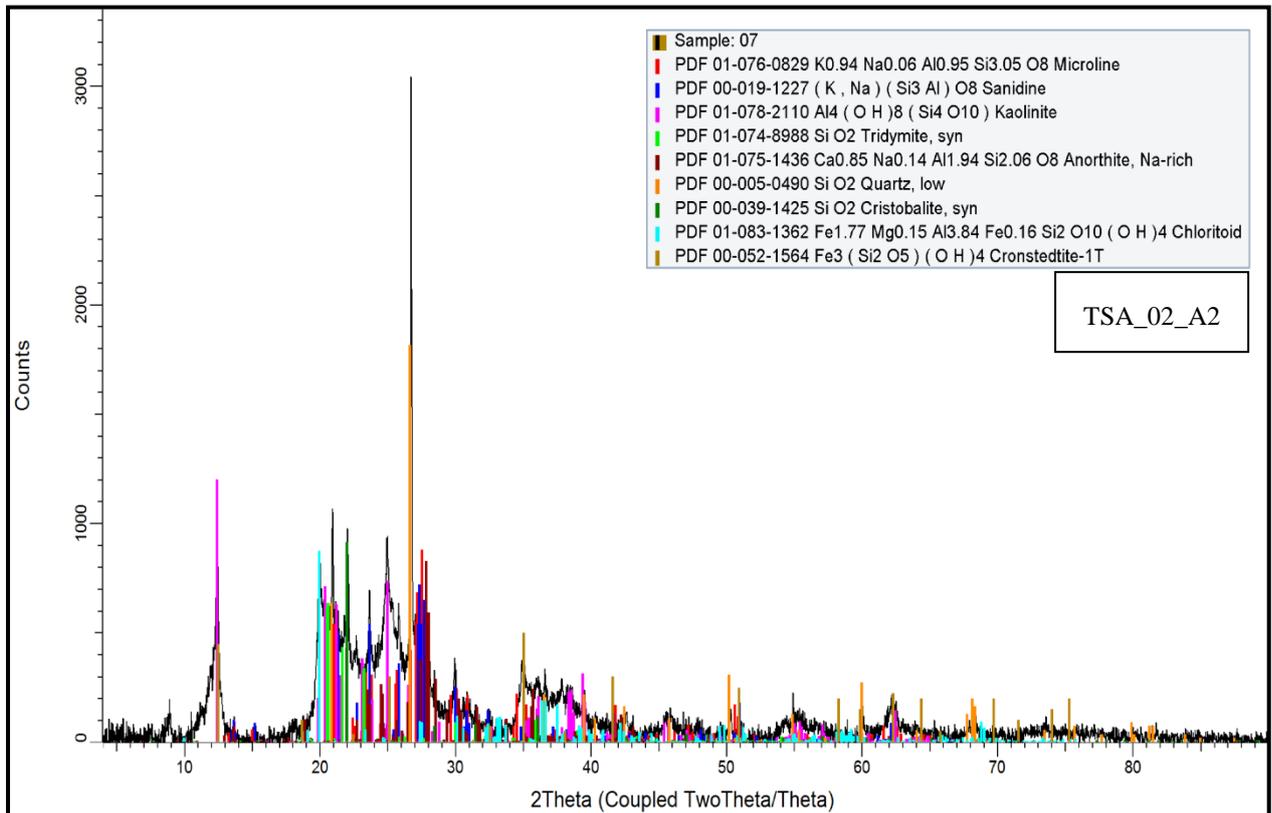
• TP_02

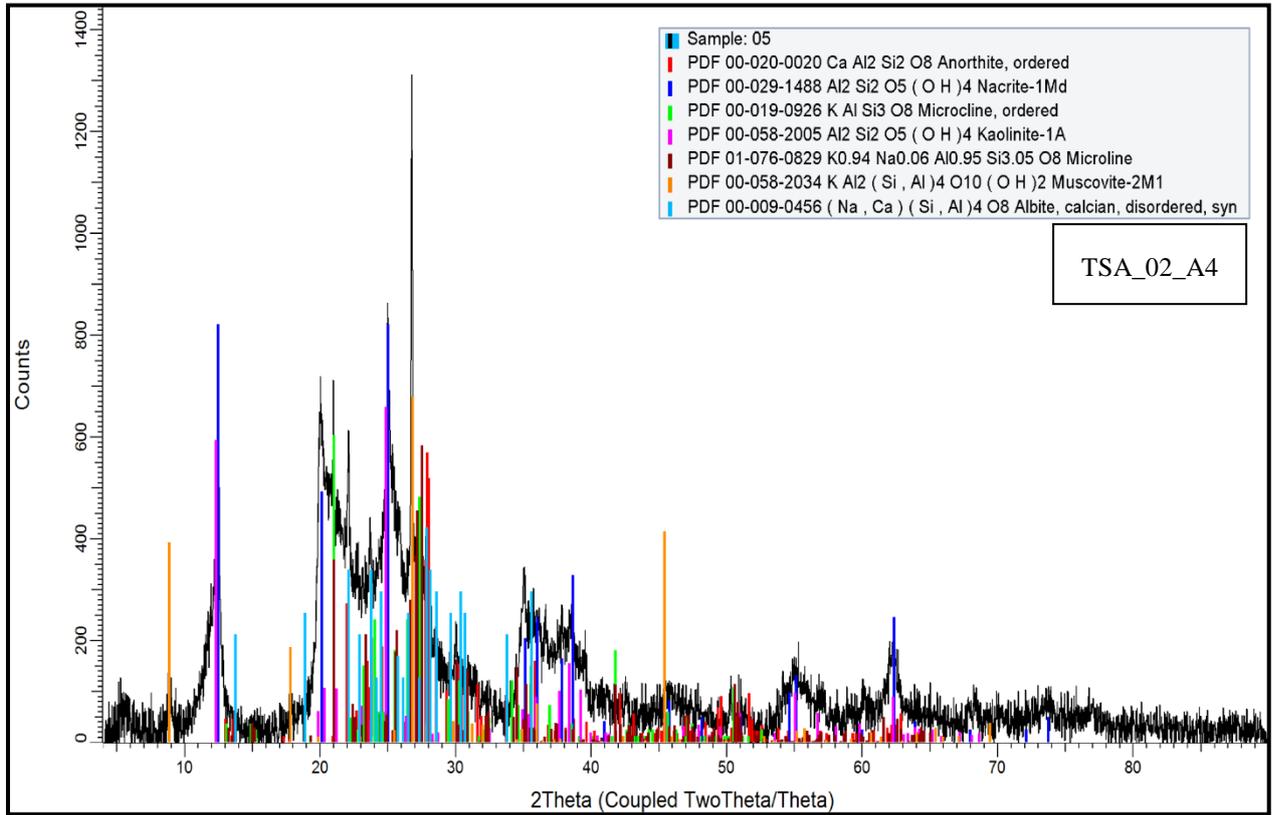




• TSA_02







II.1.7. Cálculos de conductividad extracto diluido 1:5

Muestra	Fcha.Prepar.	Lectura	Tª (°C)	W muestra	Lectura
MC_01_A1	06/03/2015	28,8	24,3	20,0019	28,4
MC_01_A1.D	12/03/2015	28	22	20	
MC_01_A2	06/03/2015	72,2	24,3	20,0086	75,15
MC_01_A2.D	07/03/2015	78,1	23,4	20,0004	
MC_01_A3	06/03/2015	34,3	23,5	20,0032	34,25
MC_01_A3.D	07/03/2015	34,2	23,3	20,001	
MC_01_B4	06/03/2015	473	23,7	20,0021	465
MC_01_B4.D	07/03/2015	457	23,1	20,0218	
MC_01_C1	06/03/2015	22,3	24	20,0078	22,4
MC_01_C1.D	07/03/2015	22,5	23,3	20,0414	
TP_01_A1	12/03/2015	25,5	22,1	20,0031	26,45
TP_01_A1.D	12/03/2015	27,4	22,3	20,011	
TP_01_A2	06/03/2015	27,4	24,5	20,0017	27,15
TP_01_A2.D	07/03/2015	26,9	23,2	20,0091	
TP_01_B6	06/03/2015	88,4	24,3	20,0019	75,85
TP_01_B6.D	07/03/2015	63,3	23,2	20,0047	
TP_01_C2	06/03/2015	37,9	22,2	20,0068	34,1
TP_01_C2.D	07/03/2015	30,3	23,7	20,0307	
TP_01_D4	06/03/2015	289	23,96	20,0002	258
TP_01_D4.D	07/03/2015	227	23,4	20,0264	
TSA_01_A1	06/03/2015	196,5	23,9	20,0038	192,75
TSA_01_A1.D	07/03/2015	189	23,8	20,0048	
TSA_01_A3	06/03/2015	31,6	23,9	20,0011	29,95
TSA_01_A3.D	07/03/2015	28,3	23,3	20,0006	
TSA_01_B1	06/03/2015	28,8	24,2	20,0012	28,4
TSA_01_B1.D	07/03/2015	28	22,3	20,0008	
TSA_01_B3	06/03/2015	37,9	24	20,0036	37,3
TSA_01_B3.D	07/03/2015	36,7	23,2	20,003	
TSA_01_B4	06/03/2015	162,8	23,7	20,0044	143
TSA_01_B4.D	07/03/2015	123,2	23,5	20,0061	
Blanco lot_1	06/03/2015	7,33	24,6		6,17
Blanco lot_1.D	07/03/2015	5,01	24,3		
Blanco ut	12/03/2015	4,71	21,4		4,71

MÉTODO EXTRACTO DILUIDO 1:5					
Muestra	Fcha.Preparación Extracto Sat	Lectura ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Tª (°C)	W muestra	Lectura Promedio
MC_02_A1	27/02/2015	137	22,4	20,0049	135,25
MC_02_A1.D	27/02/2015	133,5	23	19,9984	
MC_02_A2	27/02/2015	33,6	23	20,0035	32,85
MC_02_A2.D	27/02/2015	32,1	22,9	20,0085	
MC_02_A3	27/02/2015	465	22,9	20,0012	468,5
MC_02_A3.D	27/02/2015	472	23,1	20,0016	
MC_02_B4	27/02/2015	1240	23,3	20,0071	1253
MC_02_B4.D	27/02/2015	1266	23,6	20,0029	
BLANCO_MC_02	27/02/2015	5,83	20	0	5,83
TP_02_A1	03/03/2015	91,9	25	20,002	95,8
TP_02_A1.D	03/03/2015	99,7	25,4	20,0022	
TP_02_A3	03/03/2015	57,7	24,9	19,9989	56,65
TP_02_A3.D	03/03/2015	55,6	25,2	20,0028	
TP_02_A4	03/03/2015	1004	25,4	20,0022	1056
TP_02_A4.D	03/03/2015	1108	25,3	20,0033	
BLANCO_TP_02	03/03/2015	5,2	25,3	0	5,2
TSA_02_A1	28/02/2015	38,3	24,6	20,0022	37,95
TSA_02_A1.D	28/02/2015	37,6	24,9	20,0031	
TSA_02_A2	28/02/2015	35,2	24,8	19,9975	34,25
TSA_02_A2.D	28/02/2015	33,3	24,9	20,0026	
TSA_02_A3	28/02/2015	53,1	24,7	19,9977	51,4
TSA_02_A3.D	28/02/2015	49,7	24,7	20,006	
TSA_02_A4	28/02/2015	1314	25	19,9999	1268,5
TSA_02_A4.D	28/02/2015	1223	25	20,002	
BLANCO_TSA_02	28/02/2015	4,49	24,3	no procede	4,49

II.1.8. Índice de Fournier modificado

AÑO	El Peaje 24024	Santiago Villa de Arriaga 24078	San Luis potosí 24111	Pino Suarez 32127
	Ind Fournier Mod	Ind Fournier Mod	Ind Fournier Mod	Ind Fournier Mod
1980	25,29	7,00	32,2785078	57,30370546
1981	46,37	54,91	62,02289815	60,87043796
1982	47,07	61,46	49,8980225	52,26819923
1983	42,34	63,57	70,03787449	50,84799235
1984	90,20	43,22	0	74,34188791
1985	97,44	70,30	0	122,6847605
1986	72,08	61,49	0	92,57128358
1987	61,76	49,66	0	26,55555556
1988	67,62	94,63	0	60,83862032
1989	68,36	0,00	60,24237443	80,24679035
1990	43,24	52,42	54,3433304	78,40049787
1991	129,22	155,85	142,7669626	135,6144279
1992	70,78	76,16	63,52143892	96,86163982
1993	92,51	38,09	69,19138906	60,78947368
1994	54,23	74,47	74,83216278	91,98419919
1995	78,65	183,55	97,4622186	86,13080169
1996	67,95	113,88	71,54727765	105,9073929
1997	65,54	53,65	45,02507375	46,77107089
1998	101,74	115,08	102,9960278	143,3937782
1999	85,61	51,08	56,85509804	56,56308356
2000	55,74	45,88	46,98889966	60,45147479
2001	48,50	82,94	51,20435618	69,38094918
2002	75,35	52,59	62,37336319	88,49581227
2003	75,81	93,77	59,98384496	87,08748608
2004	107,06	113,84	91,29230369	88,10024084
2005	44,52	50,10	39,23393025	66,7459401
2006	96,13	96,24	87,71528223	79,48341374
2007	76,43	70,79	97,61876729	84,88803746
2008	181,45	130,18	89,44374034	130,6021633
2009	96,82	102,97	92,82870705	76,37675174
2010	122,92	131,50	109,4746276	109,2603438
2011	74,63	0,00	51,58722892	52,03292035
2012	0,00	0,00		72,87625745
Promedios	74,64615656	72,46399279	60,39892838	80,2038603

II.1.9. Índice de erosividad EI_{30}

Estación	El Peaje 24024	Santiago Vill	San Luis potosí	Pino Suarez
	EI_{30}	EI_{30}	EI_{30}	EI_{30}
AÑO	Calzolari et al	Calzolari et al	Calzolari et al	Calzolari et al
1980	241,62	4,03	370,76	711,77
1981	542,83	860,64	1593,70	980,00
1982	834,87	1312,09	879,03	813,44
1983	681,60	523,51	1267,14	795,16
1984	2510,05	640,15	0,00	1989,36
1985	2567,15	1486,91	0,00	3545,47
1986	1518,09	715,57	0,00	1681,31
1987	1160,01	792,80	0,00	111,80
1988	1545,43	1947,35	0,00	650,60
1989	1108,06	0,00	758,19	1217,12
1990	524,03	542,37	1102,31	1242,84
1991	3157,04	5304,96	3736,09	3484,17
1992	1911,22	2392,80	1507,69	3588,53
1993	2036,40	469,00	1251,29	879,43
1994	1122,61	1766,79	2069,81	1860,53
1995	1406,98	3456,84	1587,79	1140,09
1996	1301,27	2278,26	1204,38	1738,86
1997	1657,67	1267,86	1030,24	940,52
1998	1862,05	1874,05	1911,98	3262,90
1999	1574,23	658,20	1022,64	848,44
2000	919,11	703,04	582,43	738,64
2001	942,56	1959,76	961,77	1780,12
2002	2385,49	1214,30	1709,16	2700,70
2003	1355,51	2171,67	1133,24	2182,13
2004	4012,66	4051,17	2901,49	2837,72
2005	749,55	962,83	519,00	1234,64
2006	2907,46	2711,11	1943,05	1940,03
2007	2322,86	1144,20	2650,49	2199,74
2008	5181,53	2998,37	1586,01	2912,56
2009	2417,87	2518,15	2244,84	1857,09
2010	3617,64	3584,50	2482,39	2915,23
2011	1235,12	0,00	255,32	702,54
2012	0,00	0,00	0,00	1738,05
Promedios	1736,68	1585,25	1220,07	1733,99