



**Benemérita
Universidad Autónoma de Puebla**

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

**“DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS,
QUÍMICAS E HIDROLÓGICAS DEL SUELO EN EL
CERRO DE AMALUCAN, PUE”**

TESIS PROFESIONAL

Presentada para obtener el Título de:

Licenciatura en Ingeniería Ambiental

Presenta:

DIANA ELENA ENRIQUEZ TORRES

Asesor de Tesis: Dra. Janette Arriola Morales

**Co-asesor de Tesis: Dr. José Carlos Mendoza
Hernández**

Puebla, Pue. Junio 2018

ING
QUÍMICA

A la Vicerrectoría de Investigación y Estudios de Posgrado, por permitirme ser parte del programa de Proyectos 2017.

Por el apoyo económico destinado a la investigación de este tema de tesis y por creer en la capacidad de los jóvenes para contribuir a la comunidad científica, así como a la sociedad.

AGRADECIMIENTOS

A mi madre, mi confidente, mi amiga, mi heroína, mi apoyo incondicional, el motor de mi vida, en suma, la persona que más amo. La que además de ser mamá, es papá al mismo tiempo, la que ha hecho grandes sacrificios para darme lo que necesito y me ha heredado el mejor tesoro, una educación. Gracias por el tiempo otorgado, por los desvelos a mi lado, por cada enseñanza, por cada regaño, por cada momento compartido, por existir y hacer de mí una joven íntegra. Leti, eres mi todo.

A mis abuelos, Elena y Fulgencio, mis amados viejitos, mis segundos padres, que han cuidado de mí y me han enseñado a valorar cada aspecto en mi vida. Es un orgullo ser nieta de personas tan sinceras, nobles y humildes como ellos.

A Donají, Alfredo y Luis, compañeros de clases, inteligentes y dedicados. Personas en las que puedo confiar, por lo que con el paso de los años en la universidad se convirtieron en mis amigos. Gracias a ellos por el apoyo y la tolerancia. Sin duda, los mejores próximos ingenieros ambientales y con los que quiero compartir mis triunfos.

A la Dra. Janette Arriola Morales, por darme la oportunidad de participar en este proyecto, por ser mi asesora de tesis y apoyarme en todo momento. Gracias por compartir sus conocimientos y ayudarme a mejorar en el ámbito académico, así como en la resolución de dudas, y en general, por la confianza y la motivación que me ha brindado.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	2
JUSTIFICACIÓN	4
HIPÓTESIS	5
OBJETIVOS	5
OBJETIVO GENERAL.....	5
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	5
CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES.....	6
1.1 INFORMACIÓN GENERAL DEL SITIO	6
1.2 MARCO TEÓRICO.....	17
1.2.1 SUELO	17
1.2.2 CONDICIONES DE LA SUPERFICIE	18
1.2.3 PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUELO	19
1.2.4 PROPIEDADES QUÍMICAS DEL SUELO.....	30
1.2.5 CARACTERÍSTICAS Y PROPIEDADES HIDROLÓGICAS	42
1.2.6 SOFTWARE DE SIMULACIÓN	46
1.2.7 INFLUENCIA DE LAS ACTIVIDADES ANTROPOGÉNICAS EN EL CERRO DE AMALUCAN	48
CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA.....	55
2.1 LOCALIZACIÓN DEL SITIO	55
2.1 MUESTREO Y EVALUACIÓN DE CONDICIONES DE SUPERFICIE	57
2.2 PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS	59
2.3 DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES FÍSICAS	60
2.3.1 PROFUNDIDAD DEL SUELO.....	60
2.3.2 ELEMENTOS GRUESOS.....	61

2.3.2 ESTADO DE HUMEDAD	62
2.3.3 COLOR.....	63
2.3.4 DENSIDAD DEL SUELO Y POROSIDAD	64
2.4.5 TEXTURA.....	66
2.4.6 COEFICIENTE DE EXTENSIBILIDAD LINEAL.....	67
2.4.7 ESTABILIDAD DE AGREGADOS.....	68
2.4 DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES QUÍMICAS	69
2.4.1 pH.....	71
2.4.2 CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA	71
2.4.3 CARBONATOS Y BICARBONATOS	72
2.4.4 CLORUROS	73
2.4.5 CALCIO	74
2.4.6 MAGNESIO	75
2.4.7 NITRÓGENO.....	76
2.4.8 CARBONO ORGÁNICO Y MATERIA ORGÁNICA	78
2.4.9 ACIDEZ EXTRAÍBLE	79
2.4.10 CAPACIDAD DE INTERCAMBIO CATIONICO.....	80
2.5 DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES HIDROLÓGICAS	80
2.5 PERSPECTIVA SOCIAL	82
CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	84
3.1 CONDICIONES DE SUPERFICIE	84
3.2 DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES FÍSICAS	85
3.2.1 PROFUNDIDAD DEL SUELO.....	85
3.2.2 ELEMENTOS GRUESOS.....	86
3.3.3 CONTENIDO DE HUMEDAD	87
3.3.4 COLOR.....	88

3.3.4 DENSIDAD DEL SUELO Y POROSIDAD	91
3.3.5 TEXTURA.....	94
3.3.6 COEFICIENTE DE EXTENSIBILIDAD LINEAL.....	96
3.3.7 ESTABILIDAD DE AGREGADOS.....	97
3.2.8 RESUMEN DE PROPIEDADES FÍSICAS.....	98
3.3 DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES QUÍMICAS.....	101
3.3.1 pH.....	101
3.3.2 CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA	103
3.3.3 CARBONATOS Y BICARBONATOS	104
3.3.4 CLORUROS	106
3.3.5 CALCIO	106
3.3.6 MAGNESIO	108
3.3.7 NITRÓGENO.....	110
3.3.8 CARBONO ORGÁNICO Y MATERIA ORGÁNICA	111
3.3.9 ACIDEZ EXTRAÍBLE Y CAPACIDAD DE INTERCAMBIO CATIONICO	113
3.3.10 RESUMEN DE PROPIEDADES QUÍMICAS.....	115
3.4 DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES HIDROLÓGICAS	116
3.5 PERSPECTIVA SOCIAL	126
CONCLUSIONES	133
BIBLIOGRAFÍA	137
ANEXO FOTOGRÁFICO.....	144

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Plano del cerro de Amalucan durante su florecimiento en la época prehispánica (Toby Evans & L. Webster, 2001).	7
Figura 2. En la imagen se observan los tres montículos y algunas áreas importantes del cerro (Toby Evans & L. Webster, 2001).	7
Figura 3. Zona del cerro de Amalucan en la carta topográfica. Escala 1:50000 (INEGI, 1995).....	9
Figura 4. Uso de suelo y vegetación del cerro de Amalucan. Escala 1:50000 (INEGI, 1983).	11
Figura 5. Zona del cerro de Amalucan en la carta geológica. Escala 1:50000 (INEGI, 1985)	12
Figura 6. Información edafológica del cerro de Amalucan. Escala 1:50000 (INEGI, 1982).	15
Figura 7. Zona del cerro de Amalucan en la carta urbana del municipio de Puebla.	16
Figura 8. Triángulo de texturas adoptado por USDA.	26
Figura 9. Uso de suelo en la zona del cerro de Amalucan. Carta urbana del municipio de Puebla, 2017.....	48
Figura 10. Pinos plantados en el cerro de Amalucan a escasos centímetros de distancia entre ellos.	49
Figura 11. Restos de quema de pastizal en el cerro de Amalucan.	49
Figura 12. Restos fecales de animales en el cerro de Amalucan.....	50
Figura 13. Proyecto Parque de Amalucan.	51
Figura 14. Render de la construcción de módulos y senderos en el cerro de Amalucan.	52
Figura 15. Render de la construcción de un lago artificial.	52
Figura 16. Render de la construcción de áreas de esparcimiento.	53
Figura 17. Render de la construcción de un módulo infantil.	53
Figura 18. Primera etapa de reforestación (03/10/17)	54
Figura 19. Localización de los puntos de muestreo en el cerro de Amalucan.	57
Figura 20. Vista del perfil de suelo de uno de los puntos donde se observan elementos gruesos..	58
Figura 21. A la izquierda, precipitaciones en mm de algunas entidades federativas del país durante los primeros meses del 2017. A la derecha, mapa de precipitaciones acumuladas hasta 2017 en el país (CONAGUA).	59
Figura 22. Preparación de muestras. Secado y molienda.	60
Figura 23. Medida de la profundidad del perfil al momento de toma de muestra.	61
Figura 24. Clave para la estimación de fragmentos rocosos. FAO	61
Figura 25. Preparación de la muestra para someterla a secado en estufa.	62
Figura 26. Comparación de color empleando las tablas de Munsell	63
Figura 27. Lote de muestras para su determinación de densidad real.....	64
Figura 28. Determinación de densidad aparente mediante el método de la probeta.	65

Figura 29. Lote de muestras para la determinación de textura.	67
Figura 30. A la izquierda se muestra un lote de muestras húmedas y a la derecha se aprecia una de las muestras después del secado.	68
Figura 31. Humectación de una muestra para la determinación de estabilidad de agregados.	69
Figura 32. Sistema de vacío para la recolección del extracto de saturación.	70
Figura 33. Medición de pH por método potenciométrico.	71
Figura 34. Muestra con fenoftaleína añadida sin vire de color.	72
Figura 35. Determinación de bicarbonatos.	73
Figura 36. Vire de color para la determinación de cloruros.	74
Figura 37. Vire de color en la determinación de calcio.	75
Figura 38. Vire de color para la determinación de magnesio.	76
Figura 39. Sistema digestor.	77
Figura 40. Titulación para la determinación de materia orgánica.	78
Figura 41. Infiltración de la solución BaCl ₂ -TEA para la determinación de acidez extraíble.	79
Figura 42. Vire de color para la determinación de CIC.	80
Figura 43. Interfaz del software "Soil Water Characteristics".	82
Figura 44. Formato de la encuesta aplicada a las personas que realizan actividades en el cerro. .	83
Figura 45. Perfil del suelo de donde se obtuvo la muestra M13.	86
Figura 46. Interpretación de resultados de densidad según la NOM-021-SEMARNAT-2000.	93
Figura 47. Clasificación del espacio poroso (Flores Delgadillo & Alcalá Martínez, 2010).	93
Figura 48. Estabilidad de agregados, método tamizado de Yoder modificado (Lobo L. & Pulido M., 2006).	98
Figura 49. Representación de puntos críticos respecto a propiedades físicas.	100
Figura 50. Valores de referencia de calcio según el laboratorio AgroLab.	108
Figura 51. Valores de referencia para Magnesio según AgroLab.	109
Figura 52. Valores de referencia para el porcentaje de nitrógeno total en suelos volcánicos.	110
Figura 53. Valores de referencia de materia orgánica según la NOM-021-SEMARNAT-2000.	111
Figura 54. Interpretación de CIC según la NOM-021-SEMARNAT-2000.	114
Figura 55. Representación de puntos críticos respecto a propiedades químicas.	116
Figura 56. Curvas de propiedades hidrológicas para M1.	119
Figura 57. Curvas de propiedades hidrológicas para M2.	119
Figura 58. Curvas de propiedades hidrológicas para M3.	119
Figura 59. Curvas de propiedades hidrológicas para M4.	119
Figura 60. Curvas de propiedades hidrológicas para M5.	119
Figura 61. Curvas de propiedades hidrológicas para M6.	119
Figura 62. Curvas de propiedades hidrológicas para M7.	120

Figura 63. Curvas de propiedades hidrológicas para M8	120
Figura 64. Curvas de propiedades hidrológicas para M9	120
Figura 65. Curvas de propiedades hidrológicas para M10	120
Figura 66. Curvas de propiedades hidrológicas para M11	120
Figura 67. Curvas de propiedades hidrológicas para M12	120
Figura 68. Curvas de propiedades hidrológicas para M13	121
Figura 69. Curvas de propiedades hidrológicas para M14	121
Figura 70. Curvas de propiedades hidrológicas para M15	121
Figura 71. Curvas de propiedades hidrológicas para M16	121
Figura 72. Curvas de propiedades hidrológicas para M17	121
Figura 73. Curvas de propiedades hidrológicas para M18	121
Figura 74. Curvas de propiedades hidrológicas para M19	122
Figura 75. Curvas de propiedades hidrológicas para M20	122
Figura 76. Curvas de propiedades hidrológicas para M21	122
Figura 77. Curvas de propiedades hidrológicas para M22	122
Figura 78. Curvas de propiedades hidrológicas para M23	122
Figura 79. Curvas de propiedades hidrológicas para M24	122
Figura 80. Curvas de propiedades hidrológicas para M25	123
Figura 81. Condiciones de humedad para suelos con diferentes texturas. COMET Program	124
Figura 82. Pinos plantados a escasos centímetros.	144
Figura 83. Vegetación joven en proceso de marchitamiento.	144
Figura 84. Marchitez de pino.	144
Figura 85. Vegetación en proceso de marchitez en una zona importante.	144
Figura 86. Presencia mayoritaria de pinos con indicios de marchitamiento.	144
Figura 87. Vegetación mayoritaria de eucaliptos.	144
Figura 88. Vista del cerro desde la Av. Xonacatepec.	145
Figura 89. Apreciación de la vegetación del cerro, eucaliptos en su mayoría.	145
Figura 90. Restos de cenizas debido a actividades antropogénicas (fogatas).	145
Figura 91. Caminos amplios y escasa vegetación en la zona este del cerro.	145
Figura 92. Uno de los camino principales para subir al cerro.	145
Figura 93. Zanjas realizadas para controlar la erosión.	145

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Valores de densidad real según el tipo de suelo.	22
Tabla 2. Valores de densidad aparente según el tipo de horizonte.	23
Tabla 3. Límites de las fracciones granulométricas.	24
Tabla 4. Clases texturales de suelos	25
Tabla 5. Características del suelo al presentarse una fracción predominante.	27
Tabla 6. Coordenadas de localización de los puntos de muestreo.	55
Tabla 7. Condiciones de superficie del cerro de Amalucan.	84
Tabla 8. Profundidad de muestreo en los 25 puntos.	85
Tabla 9. Porcentaje de elementos gruesos presentes en cada punto de muestreo.	86
Tabla 10. Porcentajes de humedad de las muestras en el cerro de Amalucan.	87
Tabla 11. Resultados de color de las muestras en el cerro de Amalucan.	89
Tabla 12. Densidad real, aparente y porosidad de las muestras del cerro de Amalucan.	91
Tabla 13. Textura de las muestras del cerro de Amalucan.	94
Tabla 14. Resumen de propiedades físicas del cerro de Amalucan.	98
Tabla 15. Valores de referencia que presenta la NOM-021-SEMARNAT-2000.	102
Tabla 16. Efectos de la salinidad según la NOM-021-SEMARNAT-2000.	103
Tabla 17. Interpretación del porcentaje de carbonatos presentes en suelos según la NOM-021-SEMARNAT-2000.	104
Tabla 18. Resultados de las características y propiedades hidrológicas.	117
Tabla 19. Interpretación de valores de conductividad Hidráulica saturada.	126

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Porcentaje de humedad del suelo en el cerro de Amalucan.....	88
Gráfica 2. Densidad de las muestras del cerro de Amalucan.....	92
Gráfica 3. Porosidad de las muestras de suelo del cerro de Amalucan.	92
Gráfica 4. Distribución de arena, limo y arcilla en cada muestra del cerro de Amalucan.	95
Gráfica 5. Cantidad de muestras que presentaron una clase textural específica.	95
Gráfica 6. Coeficiente de Extensibilidad Lineal de las muestras del cerro de Amalucan.....	96
Gráfica 7. Estabilidad de agregados de las muestras del cerro de Amalucan.	97
Gráfica 8. Resultados de pH de las muestras del cerro de Amalucan.	102
Gráfica 9. Resultados de conductividad eléctrica en las muestras del cerro de Amalucan.	103
Gráfica 10. Resultado de carbonatos presentes en las muestras del cerro de Amalucan.....	104
Gráfica 11. Resultados de determinación de bicarbonatos en las muestras del cerro de Amalucan.	105
Gráfica 12. Concentración de cloruros presentes en las muestras del cerro de Amalucan.....	106
Gráfica 13. Resultados de las concentraciones de calcio en las muestras del cerro de Amalucan en meq/L.	107
Gráfica 14. Resultados de las concentraciones de calcio en las muestras del cerro de Amalucan en ppm.....	108
Gráfica 15. Resultados de las determinaciones de magnesio en las muestras del cerro de Amalucan.	109
Gráfica 16. Resultados de nitrógeno en las muestras del cerro de Amalucan.....	110
Gráfica 17. Resultados de carbono orgánico y materia orgánica en el cerro de Amalucan.....	111
Gráfica 18. Resultados de la relación carbono/nitrógeno de las muestras del cerro de Amalucan.	112
Gráfica 19. Resultados de acidez extraíble de las muestras del cerro de Amalucan.	113
Gráfica 20. Resultados de CIC en las muestras del cerro de Amalucan.....	114
Gráfica 21. Características hidrológicas de las muestras del cerro de Amalucan.	124
Gráfica 22. Conductividad hidráulica saturada (Ks) de las muestras del cerro de Amalucan.....	126
Gráfica 23. Porcentaje de personas que sabían que el cerro de Amalucan es una reserva ecológica.	127
Gráfica 24. Actividades que realizan los encuestados en el cerro.	128
Gráfica 25. Arriba a la izquierda, frecuencia de actividades deportivas; arriba a la derecha, frecuencia de actividades deportivas y esparcimiento; abajo, frecuencia de actividades deportivas y labor social.	129
Gráfica 26. Horario en el que se realizan actividades en el cerro de Amalucan.	130

Gráfica 27. Porcentaje de personas que han observado actividades de conservación en el cerro.	131
Gráfica 28. Grupos que realizan las actividades de conservación en el cerro según la opinión de los encuestados.	131
Gráfica 29. Mejoras observadas por los encuestados en cuanto a la preservación del cerro de Amalucan.	132

INTRODUCCIÓN

A lo largo de este documento se presenta la investigación realizada en el cerro de Amalucan con el propósito de determinar las propiedades físicas, químicas e hidrológicas empleando la norma mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000 y un software de simulación. También se considera el aspecto social mediante investigación de campo, con el objetivo de establecer una relación entre todos estos aspectos y la perspectiva que tiene la sociedad acerca del sitio.

Para efectos de esta investigación, el trabajo está dividido en tres capítulos, conclusiones, un anexo fotográfico y la bibliografía.

Se describen los antecedentes, con información general de la zona de estudio como sus características geográficas. Posteriormente se definen los parámetros que se evalúan, algunas relaciones entre ellos, información sobre el software de simulación que se emplea e información general de las actividades que se observan en el cerro.

También se expone la metodología usada para el muestreo, la preparación de muestras y para la determinación de las propiedades físicas y químicas.

Se muestran los resultados de todos los análisis con su respectiva interpretación y discusión, así como los resultados de las encuestas realizadas a personas que realizan actividades en el cerro de Amalucan.

Por último se dan las conclusiones del trabajo y algunas recomendaciones para la conservación de esta reserva ecológica. En el anexo se incluyen fotografías de algunos aspectos interesantes observados durante el muestreo y visitas de campo.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Desde hace varias décadas, con el establecimiento y expansión de las ciudades, se ha modificado drásticamente el ambiente, tanto en el centro de las ciudades como en las zonas circundantes. Parte de este problema es ocasionado por la migración. En 1950, poco menos de 43% de la población en México vivía en localidades urbanas, en 1990 aumentó a 71% y para 2010, esta cifra aumentó a casi 78%; en cuanto al porcentaje de personas que habitan en comunidades rurales, ésta ha disminuido. En 1950, representaba poco más del 57% del total de la población del país; en 1990 era de 29% y para el 2010, esta cifra disminuyó hasta ubicarse en 22% (INEGI, Población rural y urbana, 2011).

Por otra parte, aunque el cerro de Amalucan no es considerado como una zona forestal, es de relevancia mencionar que la región se encuentra dentro de una zona urbana con una densidad de población en aumento que puede demandar un suelo para establecerse, es decir, hacer un cambio de uso de suelo, mismo que se reporta como la principal causa de deforestación (SENADO DE LA REPÚBLICA, 2013).

Otro impacto significativo se da en las zonas protegidas, donde las prácticas recreativas y el turismo intensivo, han permitido el aprovechamiento irracional de los recursos, con el supuesto de alcanzar la sustentabilidad. Como mencionan Bringas y Ojeda (2000), el desarrollo del turismo en las Áreas Naturales Protegidas (ANP) ha intensificado la fragilidad de los ecosistemas, al intervenir en los momentos críticos de la naturaleza, como la sobre estimación de la capacidad de carga del suelo, la extracción de flora y fauna de su hábitat natural, así como la contaminación del suelo y los cuerpos de agua, debido a la generación de impactos ambientales sobre las condiciones físicas y sociales de las regiones. Así, la realidad de las ANP, difiere del propósito con el cual fueron decretadas, pues las prácticas recreativas llevadas a cabo, han generado diversas repercusiones ambientales, que hasta el momento no han sido investigadas lo suficiente, (Pérez R, *et al.*, 2009). A pesar de que estas afirmaciones se refieran a zonas de competencia federal, también deben aplicarse a zonas de competencia estatal, como las reservas ecológicas.

Profundizando en el tema, cabe mencionar que el estado de Puebla cuenta con cuatro parques metropolitanos, cinco reservas ecológicas, dos parques estatales y dos reservas

estatales conformando un total de 74 267 ha, las cuales representan cerca del 9.63% del territorio del estado (SDRSOT, 2017). Una de las reservas ecológicas con las que cuenta la ciudad de Puebla es el cerro de Amalucan, un sitio en el que se realizan actividades deportivas y de recreación principalmente. Además, se observan restos de cenizas en diversas partes del cerro, ya que se realiza la quema del pastizal continuamente, una actividad que lamentablemente no está regulada.

Aunado a estas prácticas, se encuentran las características que presenta el cerro, como su pendiente y el tipo de vegetación que predomina, por lo que se pudieran causar problemas relacionados a suelos urbanos, como las impermeabilizaciones, modificaciones hidráulicas, compactación, drenaje deficiente, y pedregosidad elevada (Porta, *et al.*, 2003).

JUSTIFICACIÓN

La zona del cerro de Amalucan está catalogada como una Reserva Ecológica por el Ayuntamiento de Puebla y la entonces Secretaría de Sustentabilidad Ambiental y Ordenamiento Territorial del Gobierno del Estado, hoy SDRSOT, contando con una superficie de 135.9 ha (SDRSOT, 2017). Es importante señalar que como Reserva Ecológica, se deben promover actividades de investigación, educación ambiental, capacitación y monitoreo, relacionadas con la conservación y desarrollo sostenible y así cumplir con algunas de las finalidades de estos sitios. De aquí la importancia de realizar el estudio de los análisis del suelo para lograr una caracterización física y química.

Ya que el suelo es el recurso indispensable para el sustento de la vida, los parámetros físicos y químicos proporcionan una visión general del comportamiento del suelo y por ende, la disponibilidad de los nutrientes y la capacidad de suministrarlos a las plantas para su correcto desarrollo.

En este aspecto, cabe mencionar un hecho bien conocido, los suelos proporcionan agua, oxígeno y sostén para las raíces de las plantas y árboles (FAO, 2015), que en la Reserva Ecológica del cerro de Amalucan, además de ser una fuente importante de oxígeno para la ciudad de Puebla, también fungen como hogar y alimento de las especies animales de la zona.

Los suelos además, cumplen una función de amortiguación al proteger las delicadas raíces de las plantas de las fluctuaciones de temperatura (FAO, 2015).

Por todo lo anterior, los parámetros físicos y químicos que se consideraron relevantes para este trabajo experimental son la densidad de campo, el porcentaje de humedad, porcentajes de arena, limo y arcilla para determinar textura, color, coeficiente de extensión lineal, estabilidad de agregados, pH, conductividad eléctrica, la concentración de carbonatos, bicarbonatos, cloruros, calcio, magnesio y nitrógeno, así como acidez extraíble, capacidad de intercambio catiónico y contenido de materia orgánica. Todo esto con la finalidad de tener un diagnóstico de la situación del suelo de la zona y generar datos para la entrada del software Soil Water Characteristics y simular las características hidrológicas, estableciendo así, una relación de todos estos parámetros y determinar si éstas influyen o no en las condiciones del suelo.

HIPÓTESIS

- El cerro de Amalucan en la ciudad de Puebla, catalogado como Reserva Ecológica protegida, presenta condiciones óptimas de suelo, permitiendo su conservación a largo plazo.
- El cerro de Amalucan en la ciudad de Puebla, catalogado como Reserva Ecológica protegida, no presenta condiciones óptimas de suelo, impidiendo su conservación a largo plazo.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Determinar las propiedades físicas, químicas e hidrológicas del suelo en el cerro de Amalucan mediante la Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000 y un software de simulación.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Evaluar los parámetros físicos y químicos del suelo del cerro de Amalucan mediante la Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000, realizando una única determinación por muestra.
2. Determinar las características del agua presente en el suelo empleando el software de simulación "Soil Water Characteristics".
3. Analizar de forma integral los resultados obtenidos y en su caso compararlo con referencias normadas.
4. Identificar las actividades antropogénicas en el cerro de Amalucan, y en su caso establecer una relación con las propiedades físicas y químicas que presenta el suelo.
5. Recomendar acciones para la conservación y/o mejora del recurso suelo.

CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES

1.1 INFORMACIÓN GENERAL DEL SITIO

El cerro de Amalucan se ubica al noreste de la ciudad de Puebla, dentro de la zona centro, entre las colonias, al norte, fraccionamiento Bosques de San Sebastián; al este, fraccionamiento Bosques Amalucan; al oeste, unidad habitacional Infonavit Amalucan; y al sur, Unidad Habitacional Militar (DGI-CLEU, 2015).

Este cerro es considerado por muchos como sitio arqueológico. Aunque no está declarado por el INAH, se sabe que debajo del suelo existen vestigios arqueológicos, ya que entre los años 800 – 300 a.C., como lo menciona Freeman (2014), tuvo lugar el florecimiento de lugares como Amalucan. La siguiente fase de las civilizaciones del valle de Puebla se lleva a cabo entre el 350 a.C. y el año 100 d.C., donde existía una marcada jerarquía de tres niveles entre ellas: los centros mayores como Cholula, los centros menores como Amalucan, y pequeñas aldeas (Freeman, 2014).

El área arqueológica de Amalucan puede dividirse en dos zonas (Toby Evans & L. Webster, 2001):

La primera de ellas se trata de los vestigios que se encuentran en el cerro. Aquí se encuentra un montículo principal con tres montículos de menor tamaño y una plaza a su alrededor. También en el cerro se descubrió evidencia de más de 100 terrazas con un uso habitacional (Toby Evans & L. Webster, 2001). Véanse figuras 1 y 2.

La segunda área se caracteriza por contar con un sistema de canales, cuyo uso está sujeto a especulación por la falta de evidencia. Una hipótesis es que estos canales ayudaron en la agricultura, sin embargo, otra hipótesis señala que los canales fueron usados para drenar el exceso de agua pluvial, y no fueron usados como sistema de irrigación (Manzanilla & López Luján, 2000).

Llegado el año 200 a.C., Amalucan empezó su declive. La gente empezó a abandonar sitios como Amalucan y se concentró en los grandes centros como Cholula (Freeman, 2014). El olvidado sistema de canales fue cubierto en su totalidad para el año 700 d.C. (Heine, 2003).

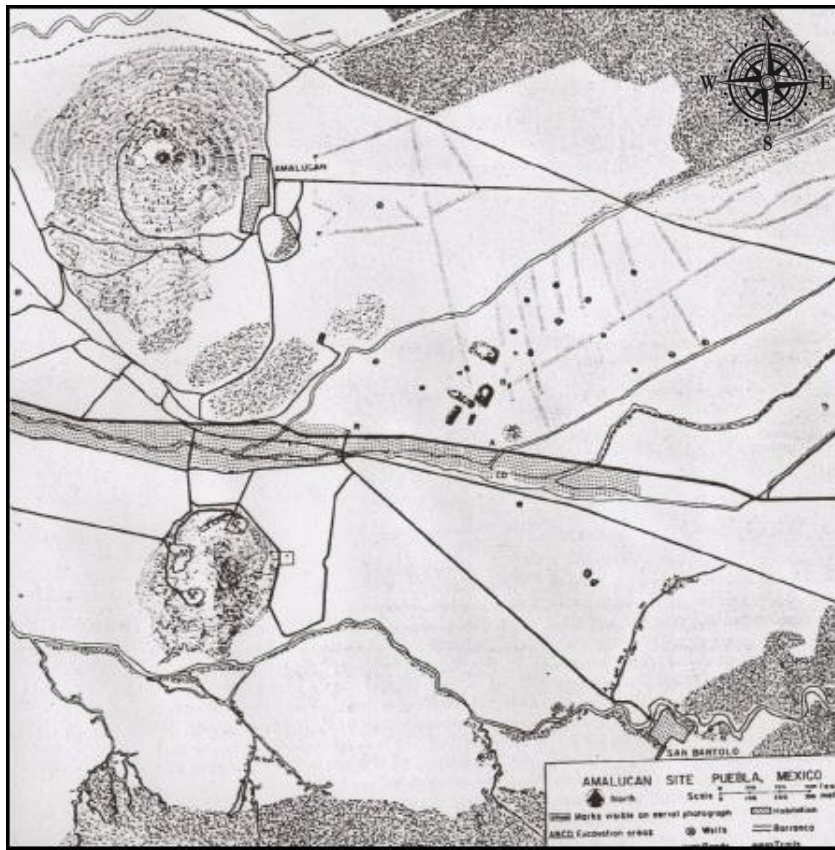


Figura 1. Plano del cerro de Amalucan durante su florecimiento en la época prehispánica (Toby Evans & L. Webster, 2001).

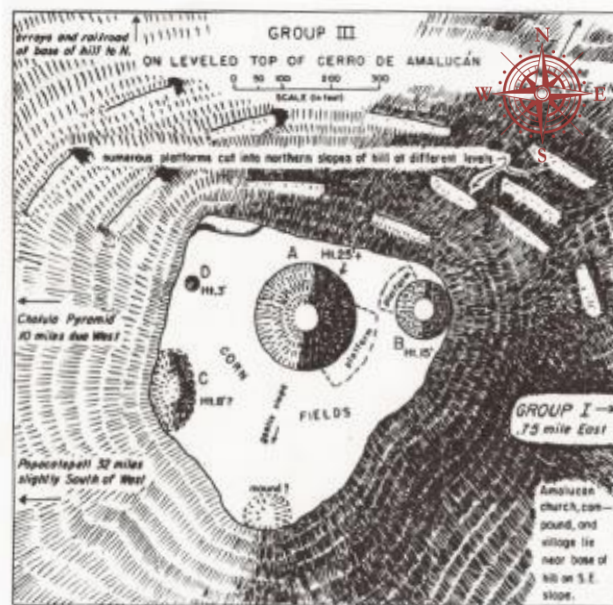


Figura 2. En la imagen se observan los tres montículos y algunas áreas importantes del cerro (Toby Evans & L. Webster, 2001).

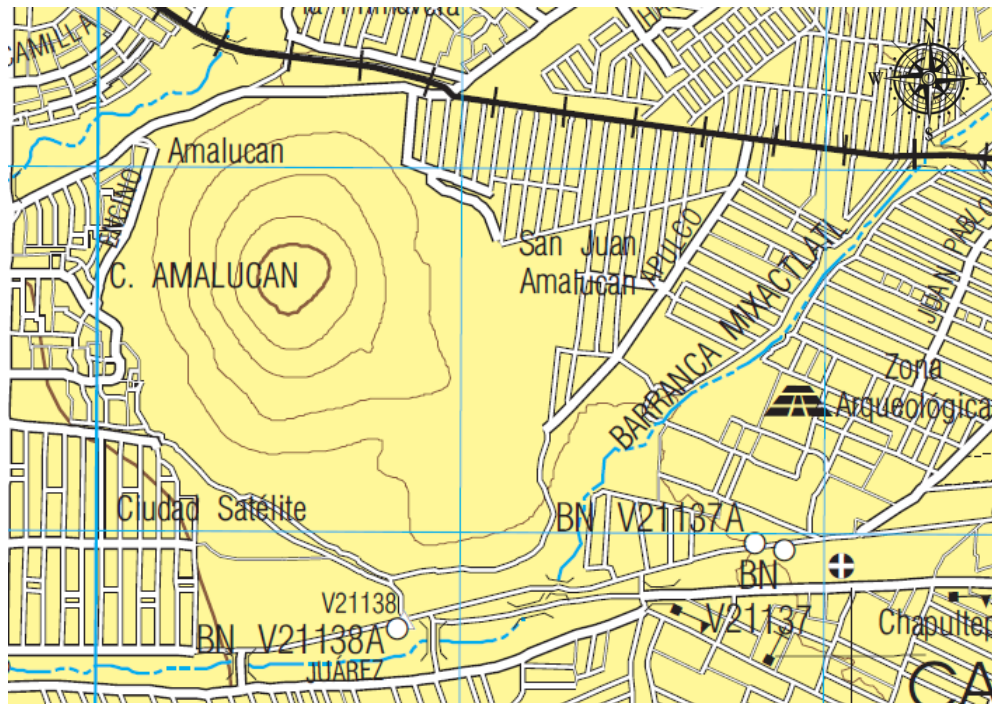
Por otro lado, según la DECLARATORIA DE RESERVAS, DESTINOS Y USOS DE PREDIOS Y ÁREAS TERRITORIALES DEL PROGRAMA REGIONAL DE ORDENAMIENTO TERRITORIAL DE LA «ZONA CENTROPONIENTE» DEL ESTADO DE PUEBLA, el 8 de abril de 1994, se declaró al cerro de Amalucan como una reserva ecológica, entre los paralelos: 19° 02' 36" y 19° 03' 11" de latitud Norte, y entre los meridianos 98° 08' 10" y 98° 08' 25" de longitud Oeste, y una altitud de 2300 m.s.n.m. como cota superior y de 2200 m.s.n.m. como cota inferior (CONANP, 2001).

Profundizando en las características del cerro de Amalucan, a continuación se presentan sus condiciones geográficas generales, así como la información característica de las cartas elaboradas por el INEGI en cuanto a topografía, uso de suelo y vegetación, geología y edafología, además de la carta urbana del municipio de Puebla que se elabora a cargo del Ayuntamiento.

El clima en la ciudad de Puebla es templado subhúmedo con lluvias en verano. La estación meteorológica ubicada en 21 Poniente Núm. 113 en la ciudad de Puebla reporta la temperatura media anual más alta de 17.3°C; en ésta el mes más frío es enero, cuya temperatura media mensual es de 14.4°C; y el más cálido, mayo con 19.8°C; la lluvia total anual es de 973.9 mm en promedio, junio es el mes que concentra mayor cantidad de lluvia, con 190.9 mm, y febrero es el mes más seco con 5.4 mm (INEGI, 2000).

Hablando sobre las cartas geográficas, en la carta topográfica de la zona, que se muestra en la figura 3, se puede observar que el cerro está dentro de un área urbana. Además se muestran las curvas de nivel que indican las distintas elevaciones, éstas son constantes sobre la misma línea de la curva.

La equidistancia entre curvas de nivel es de 20 m, correspondientes a un terreno accidentado, con una pendiente mayor del lado Poniente, alrededor de 23%, mientras que en el lado Norte tiene una pendiente aproximada de 16.5%, 15.5% en el lado Sur y en el lado Oriente se presenta el terreno más irregular, ya que en la parte alta la pendiente es de alrededor de 18.5% y disminuye en la parte baja a un valor aproximado de 8%.



OTROS RASGOS CULTURALES

ESCUELA, TEMPLO, ASISTENCIA MÉDICA _____			
EDIFICACIÓN, CASA AISLADA _____			
ÁREA URBANA, CERCA, BARDA O DIVISIÓN _____			
SITIO DE INTERÉS, CEMENTERIO _____			
MURO DE CONTENCIÓN _____			
ESTRUCTURA ELEVADA, INSTALACIONES DE COMUNICACIÓN _____			
ESTANQUE DE AGUA, TANQUE DE AGUA, OTROS DEPÓSITOS _____			

REPRESENTACIÓN DEL RELIEVE

CURVA DE NIVEL ACOTADA EN METROS _____	
CURVA DE NIVEL ORDINARIA _____	
CURVA DE NIVEL AUXILIAR _____	
CURVA DE NIVEL APROXIMADA _____	
DEPRESIÓN: MAESTRA, ORDINARIA _____	
PUNTO FOTOGRAMÉTRICO ACOTADO (METROS), ENTRADA A GRUTA _____	

Figura 3. Zona del cerro de Amalucan en la carta topográfica. Escala 1:50000 (INEGI, 1995)

En la carta de uso de suelo y vegetación, el cerro de Amalucan está catalogado como Bosque cultivado con especies de Eucalipto (BCe) y una zona como Pastizal inducido (Pi), esto puede observarse en la figura 4. En la zona también existen especies de pinos y por lo que se observa, las personas realizan labores de reforestación, sin embargo la

distribución de estos árboles no es la ideal en muchos casos, ya que está muy cercanos unos de otros.

La flora presente en mayor cantidad es el eucalipto, el cual presenta ciertas características que lo convierten en una especie controvertida por los efectos ecológicos que ocasiona.

Un estudio de la FAO, denominado *The ecological effects of eucalyptus* menciona los efectos ecológicos que tiene esta especie, de los cuales se presenta un extracto a continuación.

El agua. Si bien las cuencas de captación de los bosques de eucalipto tienen un menor rendimiento hídrico que las situadas en las zonas de matorrales o en las praderas, pueden regular mejor el caudal de agua, según el tipo de terreno. Sin embargo, se ha comprobado que en los trópicos húmedos, las plantaciones de eucaliptos jóvenes, de rápido crecimiento, consumen más agua y no regulan tan bien el caudal hídrico como los bosques naturales.

A menudo los eucaliptos se plantan en terrenos donde anteriormente no había ningún árbol. En tales circunstancias, se reduce la aportación de agua de las cuencas de captación y desciende el nivel hidrostático. El efecto es mayor cuando los árboles son jóvenes y crecen rápidamente.

Las fuertes raíces superficiales de algunos eucaliptos -aunque no de todos- hacen que estos árboles puedan competir vigorosamente con la vegetación rasante y con los cultivos vecinos cuando el agua escasea.

La erosión. Los eucaliptos no dan buenos resultados para controlar la erosión en condiciones de sequía, pues terminan con la vegetación rasante absorbiendo el agua con sus raíces. Este efecto se acentúa con la recogida o quema de hojarasca y se reduce con la construcción de terrazas. Como cortina protectora, da resultados similares a los de otros árboles de igual tamaño y forma.

Los nutrientes. Los efectos de los eucaliptos sin talar sobre el suelo en que están plantados, dependen del estado de éste; no son beneficiosos cuando sustituyen a bosques indígenas. De la experiencia recogida en el estudio de la FAO se desprende que

la cubierta muerta del eucalipto no se descompone con tanta rapidez como la de los bosques indígenas.

Competencia. Los efectos del eucalipto sobre la vegetación rasante dependen en gran medida del clima; en la mayoría de los casos se deben a la competencia por el agua; los efectos de la reducción de la luz son probablemente menores que los originados por algunas otras especies, debido a la escasa sombra que da el follaje de los eucaliptos. La vegetación rasante se ve menos afectada en un ambiente húmedo que en uno seco, caso este último en que puede reducirse gravemente, dejando el suelo desnudo y propenso a la erosión. Se sabe que algunas especies de eucalipto producen toxinas que impiden el crecimiento de algunas hierbas de ciclo anual. Además, el número y la diversidad de la fauna (mamíferos, aves e insectos), son menores en las plantaciones de eucaliptos que en los bosques naturales.

Desplazamiento Las plantaciones de eucalipto suelen desplazar a los ecosistemas existentes anteriormente (FAO, 2001).

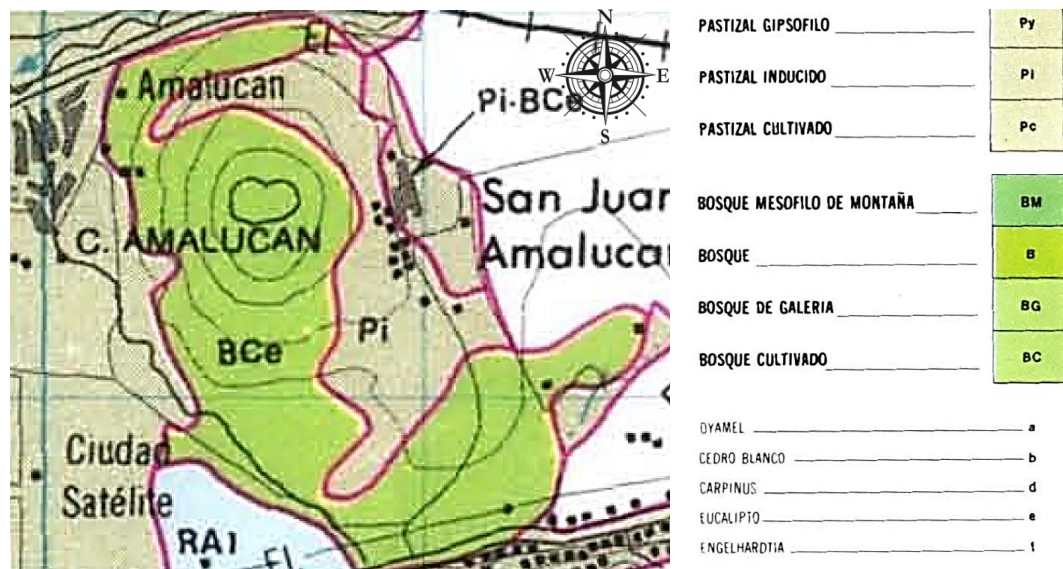


Figura 4. Uso de suelo y vegetación del cerro de Amalucan. Escala 1:50000 (INEGI, 1983).

Siguiendo con la descripción de la zona de acuerdo a las cartas, en lo que respecta a la carta geológica, se manifiesta que el cerro es de origen volcánico con rocas ígneas de tipo toba andesítica (segunda unidad litológica más común dentro de las rocas volcánicas). Esto puede observarse en la figura 5.

De acuerdo a diversas fuentes, un suelo volcánico es rico en nutrientes, ya que las erupciones volcánicas dejan espesos depósitos de piroclastos, que cuando se erosionan y se fragmentan liberan nutrientes al suelo. Esta estructura geológica superficial es originada por la emisión de material ígneo que desarrolla diversas formas de acuerdo a las características físicas, composición química y temperatura del material que lo conforma (GeoNode, 2017).

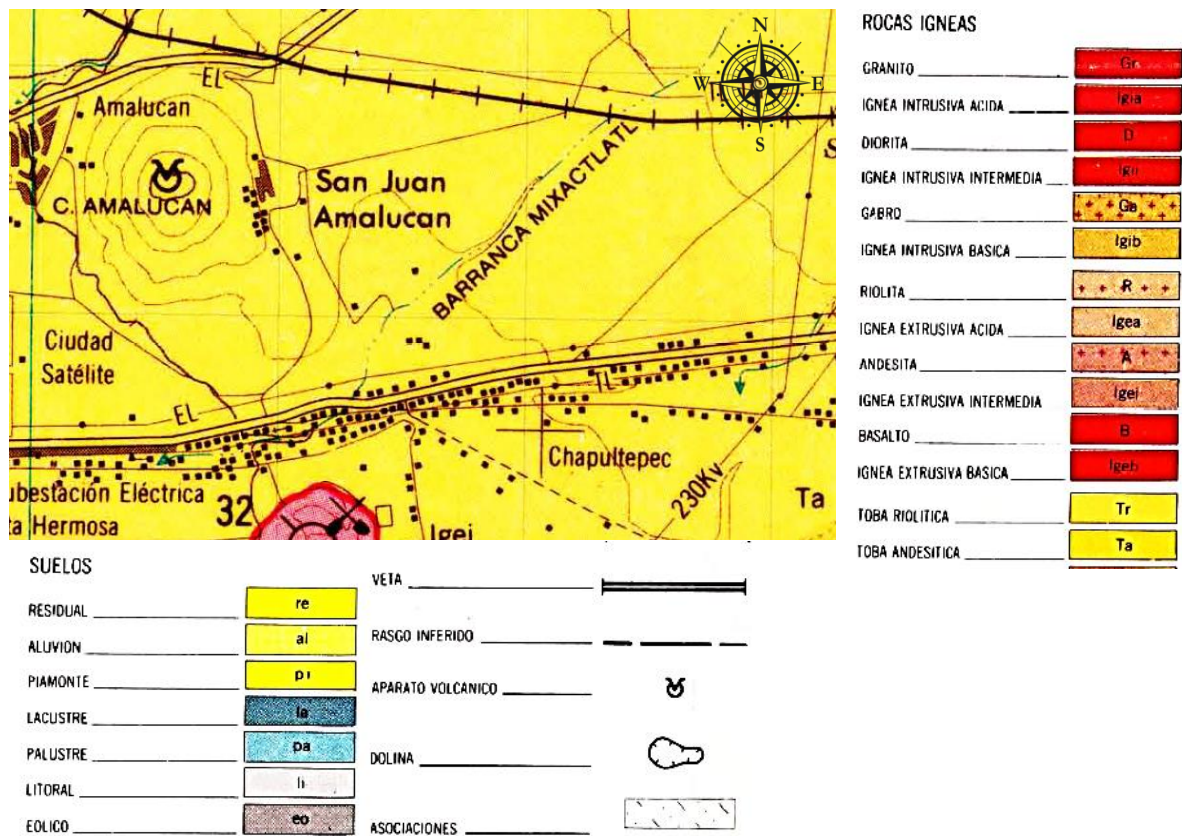


Figura 5. Zona del cerro de Amalucan en la carta geológica. Escala 1:50000 (INEGI, 1985)

Por último, la carta edafológica muestra al suelo del cerro de Amalucan, como Cambisol Vértico de clase textural media y pedregoso, dentro de sus propiedades físicas, confiriendo al cerro condiciones de subsuelo ligeramente agrietado (INEGI, 1998). Esto puede observarse en la figura 6.

Dada la importancia que tienen las características que presenta el suelo debido a la clasificación, es necesario describirlas.

Los Cambisoles combinan suelos con formación de por lo menos un horizonte subsuperficial incipiente. La transformación del material parental es evidente por la formación de estructura y decoloración principalmente parduzca, incremento en el porcentaje de arcilla, y/o remoción de carbonatos.

Descripción resumida de Cambisoles: Suelos con por lo menos un principio de diferenciación de horizontes en el subsuelo.

Material parental: Materiales de textura media derivados de un amplio rango de rocas.

Desarrollo del perfil: Los Cambisoles se caracterizan por meteorización ligera a moderada del material parental y por ausencia de cantidades apreciables de arcilla iluvial, materia orgánica, compuestos de Al y/o Fe.

Ambiente: Terrenos llanos a montañosos en todos los climas; amplio rango de tipo de vegetación.

Este grupo de suelos está particularmente bien representado en regiones templadas y boreales. Los ciclos de erosión y depósito explican la ocurrencia de Cambisoles en regiones montañosas. Los Cambisoles también ocurren en regiones secas pero son menos comunes en los trópicos y subtropicales húmedos donde la meteorización y formación del suelo proceden a mayor velocidad que en las zonas templadas, boreales y secas. Los Cambisoles también son comunes en áreas con erosión geológica activa, donde pueden ocurrir en asociación con suelos tropicales maduros.

Aunado a esto, el horizonte cámbico (del italiano *cambiare*, cambiar) es un horizonte subsuperficial que muestra evidencias de alteración respecto de horizontes subyacentes.

Un horizonte cámbico:

1. Tiene una textura en la fracción tierra fina de arenosa muy fina o franco arenosa muy fina.

2. Tiene estructura del suelo o ausencia de estructura de roca en la mitad o más del volumen de la tierra fina.
3. Muestra evidencia de alteración en una o más de las siguientes formas:
 - a. croma Munsell más alto (húmedo), value más alto (húmedo), hue más rojo, o mayor contenido de arcilla que la capa subyacente o una capa suprayacente;
 - b. evidencia de remoción de carbonatos o yeso;
 - c. presencia de estructura de suelo y ausencia de estructura de roca en toda la fracción tierra fina, si los carbonatos y yeso están ausentes en el material originario y en el polvo que cae sobre el suelo;
4. No forma parte de una capa de arado, no consiste de material orgánico.
5. Tiene un espesor de 15 cm o más.

(WRB, 2007)

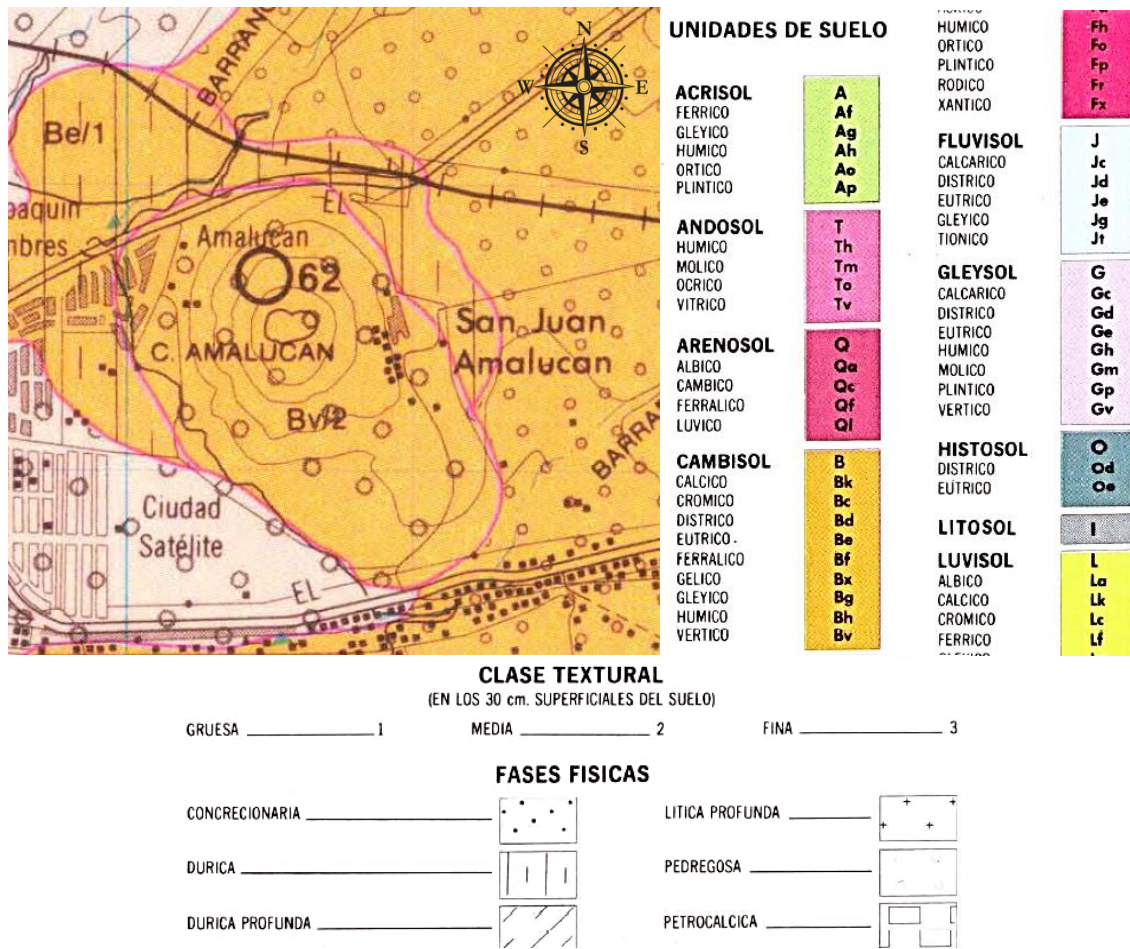


Figura 6. Información edafológica del cerro de Amalucan. Escala 1:50000 (INEGI, 1982).

Por último, dentro de la carta urbana del municipio de Puebla, se puede observar en la figura 7 que la zona del cerro de Amalucan está catalogada como zonificación secundaria, dentro de un proyecto ambiental. En el uso de suelo se considera como parque urbano con una zona arqueológica y con un inventario de área verde.



<p>Proyectos urbanos</p> <p>Proyectos</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ Ambiental ○ Tecnopolo ○ Urbano <p>Inventario de áreas verdes</p> <p>Áreas Verdes</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ 	<p>Uso de suelo</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Parque Urbano ■ Industria ■ Industria de Extracción ■ Uso Mixto Industria - Comercio - Servicios ■ Uso Mixto Densidad Muy Alta - Comercio - Servicios ■ Uso Mixto Densidad Alta - Comercio - Servicios ■ Uso Mixto Densidad Media - Comercio - Servicios ■ Uso Mixto Densidad Baja - Comercio - Servicios ■ Densidad Muy Baja ■ Protección de Recarga de Acuíferos □ Zona Militar □ Zona Arqueológica □ Zona de Monumentos ■ Equipamiento □ Restricción por Relleno Sanitario
--	---

Figura 7. Zona del cerro de Amalucan en la carta urbana del municipio de Puebla.

1.2 MARCO TEÓRICO

1.2.1 SUELO

Como otras palabras comunes la palabra suelo tiene varios significados. Su significado tradicional se define como el medio natural para el crecimiento de las plantas. La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, lo ha definido como un cuerpo natural que consiste en capas de suelo (horizontes del suelo) compuestas de materiales de minerales meteorizados, materia orgánica, aire y agua. El suelo es el producto final de la influencia del tiempo y combinado con el clima, topografía, organismos (flora, fauna y ser humano), de materiales parentales (rocas y minerales originarios). Como resultado, el suelo difiere de su material parental en su textura, estructura, consistencia, color y propiedades químicas, físicas y biológicas (FAO, 2014).

Buckman y Brady definen al suelo como un cuerpo natural, sintetizado en su perfil a partir de una mezcla variable de minerales desmenuzados y modificados atmosféricamente, junto con materia orgánica en desintegración, que cubre la tierra en una capa delgada y que proporciona, cuando tiene cantidades adecuadas de aire y agua, el soporte mecánico y, en parte, el sustento de las plantas.

Siguiendo esta definición, cabe mencionar que los suelos minerales constan de cuatro grandes componentes: material mineral, materia orgánica, agua y aire. Por lo general, yacen en un fino estado de subdivisión e íntimamente mezclados (O. Buckman & C. Brady, 1982). Resultado de la proporción de estos componentes, así como de los procesos de meteorización y los diversos procesos que tienen lugar en el suelo, se establecen propiedades que ayudan a caracterizar el suelo para propósitos específicos.

Las propiedades físicas y químicas a analizar para la comprobación de la hipótesis están interrelacionadas y son de suma importancia para evaluar el estado actual del suelo, además de que gracias a estas propiedades es posible determinar mediante un software de simulación las características hidrológicas, por lo que para efectos de este escrito es necesario describirlas.

1.2.2 CONDICIONES DE LA SUPERFICIE

1.2.2.1 POSICIÓN FISIAGRÁFICA

Existen cinco posiciones fisiográficas en la clasificación: tierra alta, terraza elevada, terraza baja, valle y depresión.

Tierra alta. Montañas, lomas, con suelos derivados en el lugar por la descomposición o desintegración de la roca madre subyacente; son suelos primarios o residuales.

Tierra elevada. Ocupa una posición bastante elevada sobre la tierra del valle, por lo general con suelos secundarios.

Terraza baja. Ocupa una posición ligeramente elevada sobre el abanico aluvial y los depósitos de inundación de la llanura con suelos secundarios.

Valle. Ocupa una posición baja; en general con pendiente muy ligera, con suelos secundarios.

Depresión. Ocupa una posición baja, generalmente casi llana, por lo normal con suelos secundarios de textura fina tipo arcilloso (R. Earl, 1970).

1.2.2.2 PENDIENTE DEL TERRENO

A pesar de ser importante en la clasificación, también la pendiente tiene influencia en el uso de la tierra. Los suelos secundarios ocurren en pendientes más uniformes que los suelos primarios de las lomas y montañas (R. Earl, 1970).

Las pendientes se clasifican en varios grupos:

Ao: A nivel o casi nivel.

A: Casi a nivel o con pendiente muy ligera (0.5 – 2%).

AA: Muy ligera ondulada (compleja de 0.5 – 2%).

B: Pendiente ligera (3 – 8%).

BB: Ondulada (compleja de 3 – 8%).

C: Pendiente moderada (9 – 15%).

CC: Quebrada (compleja de 9 – 15%).

D: De lomerío (16 – 30%).

E: Colgada (31 – 41%).

F: Muy colgada (más de 45%).

1.2.2.3 EROSIÓN Y DEPÓSITO

Todos los suelos con alguna pendiente y poca vegetación se erosionan en cierto grado. La erosión se intensifica con la eliminación de la cubierta vegetal protectora del suelo. La lluvia intensa, el sobrepastoreo, la tala de árboles y labores de cultivo inadecuadas.

Cuanto más grande sea la pendiente, mayor es el peligro de erosión. Los suelos con pendientes más colgadas se erosionan en forma intensa si no se les protege (R. Earl, 1970).

1.2.2.4 DRENAJE EXTERNO O ESCURRIMIENTO

El drenaje de la superficie ocurre cuando el agua permanece en la superficie por algún tiempo.

La mayoría de los suelos aluviales de pendiente ligera y las tierras altas onduladas o quebradas, están bien drenadas; por otro lado, cuando el agua de escurrimiento cubre un terreno y luego se drena lentamente, se le clasifica como sujeto a inundación.

Las pendientes colgadas o muy colgadas, que no tienen una buena cubierta de vegetación, generalmente tienen un escurrimiento excesivo o rápido (R. Earl, 1970).

1.2.3 PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUELO

1.2.3.1 PROFUNDIDAD DEL SUELO

La profundidad del suelo es muy importante porque de ella depende el volumen de agua que el suelo puede almacenar para las plantas. Es un factor esencial en el desarrollo de

las plantas en los climas áridos o semiáridos, en las tierras altas poco profundas y en los suelos con estrato cementado (R. Earl, 1970).

1.2.3.2 ELEMENTOS GRUESOS

Los elementos gruesos son los fragmentos de roca o de mineral de diámetro aparente superior a 2 mm. El grado de homogeneidad del tamaño de los elementos gruesos permite considerarlos como homométricos, o bien, heterométricos. La forma de los elementos gruesos puede proporcionar información acerca de su procedencia y condiciones de transporte, si lo ha habido. La distribución puede indicar la procedencia de los materiales o posibles discontinuidades.

Dentro de este tema se encuentra el término de pedregosidad, que hace referencia a los elementos gruesos que se hallan en la superficie (Porta, *et al.*, 2003).

Para propósitos de descripción de suelos, se deben registrar las características de la superficie del suelo, como afloramientos rocosos y fragmentos gruesos rocosos.

Los afloramientos rocosos, que se refieren a la exposición de la roca madre, deben ser descritos en términos de porcentaje de cobertura en la superficie, junto con información adicional relevante al tamaño, espaciamiento y dureza de los afloramientos.

Por otro lado, los fragmentos gruesos superficiales, que incluyen aquellos que se exponen parcialmente, deben de ser descritos en términos de porcentaje de cobertura superficial (FAO, 2009).

1.2.3.3 CONTENIDO DE HUMEDAD

El término humedad se prefiere al de contenido de agua, ya que el primero tiene connotaciones de intensidad, mientras que el segundo implica únicamente cantidad.

El estado de humedad hace referencia a las condiciones de humedad en un horizonte en el momento de estudiar el suelo (Porta, *et al.*, 2003), y depende en muchas ocasiones, de la distribución del tamaño de partícula, mineralogía de arcilla, materia orgánica y estructura o disposición física de las partículas (USDA, Soil Survey Field and Laboratory Methods Manual, 2014).

1.2.3.4 COLOR

El **color** es una propiedad que intrínsecamente no tiene apenas significación sobre el comportamiento del suelo. Como lo mencionan Bigham y Ciolkosz (1993), su interés radica en que permite inferir otras propiedades, la naturaleza posible de los componentes y la respuesta esperable de las plantas (Porta, *et al.*, 2003).

Las diferencias de color en relación con otras características, como el drenaje, el contenido de arcilla, el agregado de granos y la distribución de las raíces son indicios de la oxidación y reducción, así como del movimiento y reordenamiento de los constituyentes. Una serie de sustancias en diversas combinaciones y estados contribuyen al color del suelo. El color del suelo depende no sólo de la cantidad y el grado de oxidación e hidratación de los óxidos de hierro, sino también de la cantidad y el estado de descomposición de la materia orgánica, así como de la forma en que se dispersa (USDA, Soil Survey Field and Laboratory Methods Manual, 2014).

En grado considerable, el color indica el efecto de uno o más de los factores de formación del suelo: vegetación natural, clima o roca madre (R. Earl, 1970). La materia orgánica contribuye a los colores negro, marrón, rojizo y grisáceo. Los suelos con altos contenidos de óxidos de hierro son rojos, marrones o amarillos. Los minerales y algunos de los fragmentos de roca que constituyen la mayor parte de la arena, limo y arcilla son en su mayoría incoloros, de color pálido o gris. Por lo tanto, la mayoría de los colores de alto croma son el resultado de recubrimientos de material secundario liberado por meteorización y materia orgánica en los horizontes superficiales. En la mayoría de los suelos, el color resulta de los óxidos de hierro y, en menor grado, de óxidos de manganeso y algunas veces óxidos de titanio que se liberan de los minerales primarios. En la mayoría de los suelos, los colores rojos se deben al óxido de hierro. Algunos colores grises y negros del subsuelo se deben a los óxidos de manganeso (USDA, Soil Survey Field and Laboratory Methods Manual, 2014).

La observación visual del color del suelo no siempre es exacta, debido a que las personas expresan el color en forma distinta, por lo que ahora existen normas de color para los suelos. La notación de Munsell es una norma internacional que analiza el color en términos de matiz, brillo o valor y croma o saturación (R. Earl, 1970).

1.2.3.5 DENSIDAD DEL SUELO Y POROSIDAD

La densidad real (ρ_s) corresponde a la densidad media de la fase sólida o densidad de las partículas. La ρ_s para un horizonte dado, será prácticamente constante a lo largo del tiempo al ser independiente de la estructura y variar poco la naturaleza de las partículas (Porta, *et al.*, 2003). Los valores más frecuentes se presentan en la tabla 1.

Tabla 1. Valores de densidad real según el tipo de suelo.

$\rho_s = \frac{m_s}{V_s}$	Minerales de arcilla	2000 – 2650 kg/m ³
	Cuarzo, feldespato	2500 – 2600 kg/m ³
	Minerales con elementos metálicos	4900 – 5300 kg/m ³
	Horizontes minerales	2600 – 2750 kg/m ³
	Horizontes orgánicos	1100 – 1400 kg/m ³
	Horizontes ricos en minerales pesados	2750 kg/m ³
	Valor medio para suelos minerales	2650 kg/m ³
	Suelos ricos en materia orgánica	$\rho = 2650 \frac{1450 \times \% m. o.}{100}$

Nota. Recuperado de: Porta, *et al.*, 2003.

La **densidad aparente** (ρ^b) se define como la masa por unidad de volumen que ocupa la muestra en el campo; incluye el volumen de sólidos y el espacio poroso. Esta propiedad tiene interés desde el punto de vista del manejo de suelo, ya que informa sobre la compactación de cada horizonte, y permite inferir las dificultades para la emergencia, el enraizamiento y la circulación del agua y el aire. La ρ^b está directamente relacionada con la estructura del suelo. De manera general se establecen las relaciones presentadas en la tabla 2. Cabe destacar que el valor de la densidad aparente presenta limitaciones importantes, ya que no proporciona información acerca del tamaño de los huecos, ni sobre la conexión entre ellos, o de las fuerzas que han dado lugar a una estructura específica. (Porta, *et al.*, 2003)

Tabla 2. Valores de densidad aparente según el tipo de horizonte.

$\rho^b = \frac{m_s}{V_T}$	Horizontes arenosos	1450 – 1600 kg/m ³
	Horizontes arcillosos con estructura	1050 – 1100 kg/m ³
	Horizontes compactos	1900 – 1950 kg/m ³
	Horizontes suelos volcánicos	850 kg/m ³
	Valor medio	1350 kg/m ³
	Horizonte turboso	250 kg/m ³

Nota. Recuperado de: Porta, et al., 2003.

El volumen de las fases líquida y gaseosa, o el de esta última si el suelo está seco, definen el espacio de huecos. Este espacio está ligado a la estructura de cada horizonte, por lo que depende de los mismos factores de control; resulta de la agregación de las partículas minerales individuales con participación de la materia orgánica.

La relación entre el volumen de huecos y el volumen total se define como porosidad (Porta, et al., 2003)

1.2.3.6 TEXTURA

La textura del suelo es la proporción numérica (por ciento en peso) de arena, limo y arcilla en la fracción de tierra fina (≤ 2 mm). La distribución del tamaño de partícula o la clase de textura está relacionada con la meteorización y el material parental. Las diferencias entre los horizontes pueden estar relacionadas con factores tales como los materiales finos, la destrucción u otras pérdidas de minerales y la formación de éstos, así como de sustancias no cristalinas. También pueden deberse a diferencias en la textura de los materiales originales de los horizontes (USDA, Soil Survey Field and Laboratory Methods Manual, 2014).

El estudio de partículas minerales consiste en determinar la granulometría de la fracción mineral, expresando así, las proporciones relativas de las distintas partículas minerales inferiores a 2 mm, agrupadas por clases de tamaños, en fracciones granulométricas, tras la destrucción de los agregados. Por tanto, la textura es una expresión sintética de las

características de cada horizonte que dependen de la proporción de los distintos tamaños de partículas.

El interés en conocer la granulometría reside en que permite inferir otras propiedades y características directamente con el uso y comportamiento del suelo como:

- La capacidad de retención de agua disponible para las plantas.
- Facilidad para la circulación del agua.
- Facilidad para el laboreo.
- Riesgo de formación de sellado y de costra superficial.
- Riesgo de erosión hídrica.
- Riesgo de erosión eólica.
- Capacidad para almacenar nutrientes. (Porta, *et al.*, 2003)

1.2.3.6.1 FRACCIONES GRANULOMÉTRICAS

Los criterios para separar los distintos tamaños de partículas son un tanto arbitrarios y desafortunadamente, aún no hay una clasificación aceptada universalmente. La clasificación estandarizada por el Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA por sus siglas en inglés) difiere de la Sociedad Internacional de la Ciencia del Suelo (ISSS por sus siglas en inglés), así como de Sociedad Americana para pruebas y materiales (ASTM), el Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT) y otros institutos internacionales (Hillel, 1998).

De manera general, las distintas fracciones utilizadas, así como su justificación y sus límites, son las siguientes:

Tabla 3. Límites de las fracciones granulométricas.

Límite	Fracción	Justificación
>2 mm	Elementos gruesos	A partir de este tamaño las fuerzas de unión actúan difícilmente y las partículas se mantienen siempre separadas sin cohesión, incluso si están húmedas.
200 µm	Límite superior de la arena fina ISSS	Por debajo de este tamaño, los granos de los minerales formadores de las rocas se presentan separados.

50 μm	Límite superior del limo USDA	El predominio de las partículas de tamaño limo (50 – 2 μm) en un suelo le confiere unas características físicas desfavorables, inestabilidad estructural, apelmazamiento, susceptibilidad a formar costra superficial, deficiente movimiento del agua, etc.
20 μm	Límite superior del limo ISSS	Límite arbitrario.
$\leq 2 \mu\text{m}$	Arcilla	Partículas con importante carga eléctrica superficial. Superficie específica elevada.
$\leq 0.2 \mu\text{m}$	Arcilla fina	Partículas con carga eléctrica superficial. Comportamiento coloidal. Superficie específica muy elevada.

Tabla 3 Continuación. Límites de las fracciones granulométricas.

Nota. Recuperado de: Porta, et al., 2003.

Todos los sistemas han adoptado como límites extremos comunes 2 mm y 2 μm . los límites a 20 μm y 50 μm son bastante arbitrarios. El predominio de la fracción de 50 a 100 μm favorece la formación de poros de tamaños muy pequeños (20 – 30 μm), que tienen una baja eficiencia de transferencia de agua (Porta, et al., 2003).

1.2.3.6.1 CLASES TEXTURALES

Las distintas combinaciones de porcentajes de arena, limo y arcilla, se agrupan en clases texturales que facilitan la utilización de la información. Esta información se representa mediante los triángulos de textura o diagramas triangulares. La tabla 4 presenta las clases texturales con los límites de arena, limo y arcilla y en la figura 8 se muestra el triángulo de textura adoptado por la USDA.

Tabla 4. Clases texturales de suelos

Nombres vulgares de los suelos	Arenoso	Limoso	Arcilloso	Clase textural
Suelos arenosos (textura gruesa)	86-100	0-14	0-10	Arenoso
	70-86	0-30	0-15	Franco arenoso
Suelos francos (textura	50-70	0-50	0-20	Franco arenoso

moderadamente gruesa)				
Suelos francos (textura mediana)	23-52	28-50	7-27	Franco
	20-50	74-88	0-27	Franco limoso
	0-20	88-100	0-12	Limoso
Suelos francos (textura moderadamente fina)	20-45	15-52	27-40	Franco arcilloso
	45-80	0-28	20-35	Franco arenoso arcilloso
	0-20	40-73	27-40	Franco limoso arcilloso
Suelos arcillosos (textura fina)	45-65	0-20	35-55	Arcilloso arenoso
	0-20	40-60	40-60	Arcilloso limoso
	0-45	0-40	40-100	Arcilloso

Nota. Recuperado del Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA).

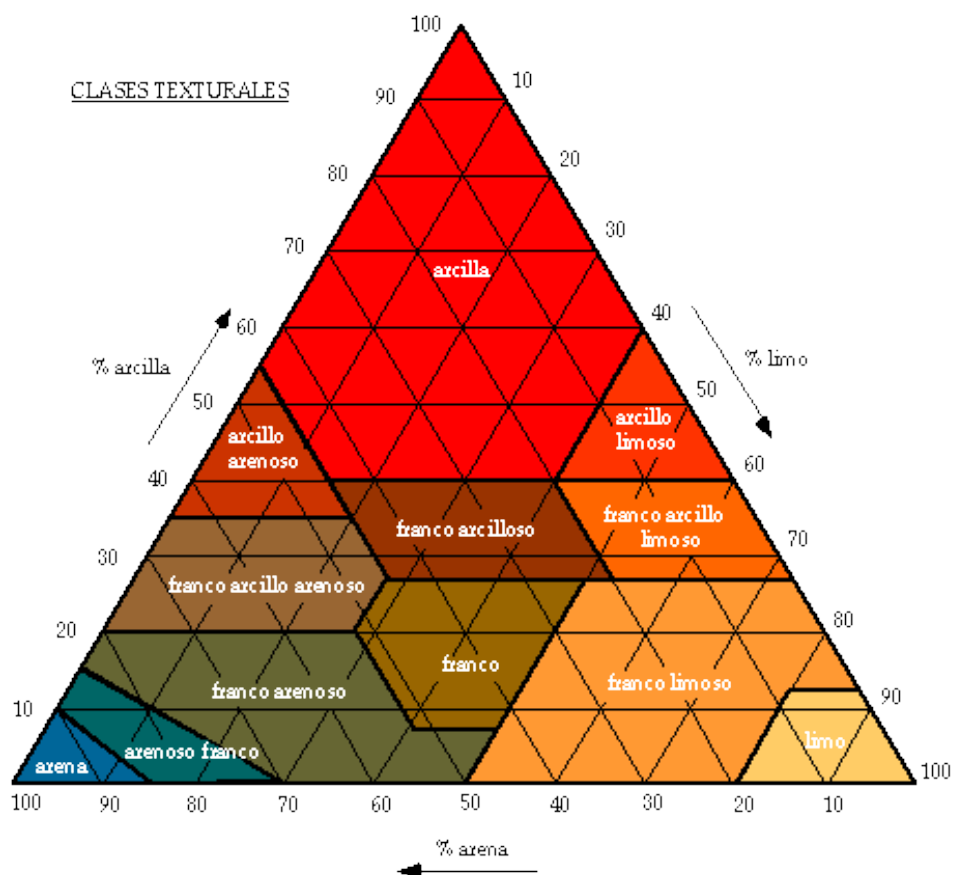


Figura 8. Triángulo de texturas adoptado por USDA.

Al predominar una de las fracciones pueden presentarse ciertas acciones significantes, como se muestra en la tabla 5.

Tabla 5. Características del suelo al presentarse una fracción predominante.

Fracción predominante	Significación
Arena gruesa	Macroporosidad alta. Permeabilidad alta. Compacidad baja. Poca inercia térmica. Facilidad de laboreo. Energía de retención de humedad baja. Almacenamiento de nutrientes, CIC baja. Capacidad de retención de agua disponible para las plantas baja.
Arena fina	Propiedades intermedias entre arena gruesa y limo. Minerales poco meteorizables. Riesgo de erosión eólica alto.
Limo (franco-limoso)	Fertilidad física deficiente. Riesgo de sellado y encostramiento superficial. Velocidad de infiltración baja. Inestabilidad estructural alta. Permeabilidad de media a baja. Compacidad media. Erosionabilidad alta. Almacenamiento de nutrientes medio. Capacidad de retención de agua disponible para las plantas de media a baja.
Arcilla	Fertilidad química alta, según la mineralogía. Superficie específica muy alta. Capacidad de intercambio catiónico alta, dependiendo de la mineralogía de arcillas. Capacidad de retención de agua disponible para las

Fracción predominante	Significación
	plantas alta. Microporosidad alta. Compacidad alta. Dificultad de laboreo debido a la elevada plasticidad (estado húmedo) o compacidad (en seco). Energía de retención de humedad alta. Gran inercia térmica. Dificultad a la penetración de las raíces.

Tabla 5 Continuación. Características del suelo al presentarse una fracción predominante.
Nota. Recuperado de Porta, et al., 2003

1.2.3.7 COEFICIENTE DE EXTENSIBILIDAD LINEAL

El coeficiente de extensibilidad lineal (COLE) es un valor que denota el cambio fraccional en la dimensión de los terrones de un estado húmedo a seco.

La cuantificación del COLE puede usarse para hacer inferencias sobre la capacidad de contracción, así como de la mineralogía de arcilla. Algunos suelos con contenidos relativamente altos de arcilla tienen la capacidad de hincharse significativamente cuando están húmedos y de encogerse y agrietarse cuando están secos. Este potencial de contracción es importante para las cualidades físicas del suelo (grandes y profundas grietas en estaciones secas), así como para procesos genéticos y clasificación de suelos (USDA, Soil Survey Field and Laboratory Methods Manual, 2014).

1.2.3.8 ESTABILIDAD DE AGREGADOS

Un agregado es un grupo de partículas primarias que se unen entre sí más fuertemente que con otras partículas del suelo circundantes. Marquez, *et al.* (2004) define agregados del suelo con diámetros >250 µm como macroagregados. Los macroagregados grandes tienen diámetros >2000 µm, los macroagregados pequeños tienen diámetros entre 250 y 2000 µm; los microagregados tienen diámetros entre 53 y 250 µm y la fracción mineral tiene diámetros <53 µm (USDA, Soil Survey Field and Laboratory Methods Manual, 2014).

La desagregación de la masa del suelo en agregados requiere la aplicación de una fuerza perturbadora. La estabilidad del agregado es una función de si las fuerzas cohesivas entre las partículas pueden soportar la fuerza disruptiva aplicada y es el resultado de interacciones complejas entre procesos biológicos, químicos y físicos en el suelo (USDA, Kellogg Soil Survey Laboratory Methods Manual, 2014).

En otras palabras, la estabilidad de los agregados hace referencia a la capacidad de estos para mantener su forma al estar sometidos a fuerzas inducidas artificialmente, en concreto las derivadas de la humectación, impacto de las gotas de lluvia o el paso de agua o a un determinado proceso dispersivo. Esta reacción refleja las propiedades de la superficie de las partículas, dependientes en gran manera, de los tipos de iones adsorbidos en ellas. La estabilidad de la estructura determina la distribución del tamaño de poros y por ello, los procesos de transferencia (Porta, *et al.*, 2003).

La estructura del suelo y los agregados del suelo juegan un papel importante en una serie de procesos, tales como la erosión, la protección de la materia orgánica y la fertilidad del suelo, por tanto, la medición puede servir como predictor de la infiltración y potencial de erosión del suelo (USDA, Kellogg Soil Survey Laboratory Methods Manual, 2014).

Frecuentemente, el concepto de estabilidad de agregados es aplicado a la acción destructiva del agua más que a la erosión eólica, ya que la humectación de los agregados puede causar su colapso, debido a que las sustancias de unión se disuelven o se debilitan a medida que la arcilla se hincha. Si el humedecimiento no es uniforme, una parte de los agregados se hinchará más que otra, por lo que el estrés resultante causado durante la contracción posterior, podría fracturar el agregado. Las gotas de lluvia y el flujo de agua proveen la energía para despegar las partículas y transportarlas. La abrasión por partículas transportadas como materia en suspensión en el agua de escorrentía contribuye al desglose de la estructura de los agregados en la superficie del suelo (Hillel, 1998).

1.2.4 PROPIEDADES QUÍMICAS DEL SUELO

1.2.4.1 pH

El pH es una de las mediciones más comunes e importantes en los análisis químicos rutinarios de suelo, ya que controla reacciones químicas y biológicas en el suelo.

La determinación del pH es afectada por varios factores tales como: la naturaleza y el tipo de materia inorgánica y orgánica, la cantidad y el tipo de cationes y aniones intercambiables, el tipo y cantidad de constituyentes orgánicos e inorgánicos que contribuyen a la acidez del suelo, la concentración de sales en la solución, la relación suelo-solución, la presión parcial de dióxido de carbono y el efecto de la suspensión asociado con el potencial de unión, entre otros (NOM-021-SEMARNAT-2000, 2002).

El pH dice más sobre un suelo que meramente si es ácido o básico, también indica la disponibilidad de nutrientes esenciales. La toxicidad de otros elementos puede estimarse debido a su relación conocida con el pH (SSSA, 1996). La acidez, la neutralidad o la basicidad de un suelo influyen en la solubilidad de diversos compuestos, el enlace iónico relativo a los sitios de intercambio y las actividades microbianas. Dependiendo del tipo de arcilla predominante, el pH puede usarse como indicador relativo de la saturación de bases (USDA, Soil Survey Field and Laboratory Methods Manual, 2014).

Los cambios estacionales en la humedad del suelo, la temperatura, la actividad microbiana y el crecimiento de las plantas pueden hacer que el pH del suelo varíe. El efecto estacional es el resultado de la pérdida, formación o acreción de sales durante las diversas épocas del año (SSSA, 1996). La concentración de sal fluctúa a medida que el suelo se moja y se seca. A medida que el suelo se seca, la concentración de sal aumenta, los cationes solubles reemplazan los iones intercambiables de hidronio o aluminio, y la solución se vuelve más ácida. Los cambios estacionales en la temperatura afectan la solubilidad del dióxido de carbono en el agua y la acidez de la solución. El dióxido de carbono es más soluble a temperaturas frescas y hace que el suelo sea más ácido. Por el contrario, el CO₂ es menos soluble en las estaciones cálidas, pero la respiración microbiana produce más CO₂, por lo que el efecto neto sobre el pH es variable. Las diferencias estacionales en la cantidad de iones carbonato y bicarbonato en solución dan lugar a un pH variable (USDA, Soil Survey Field and Laboratory Methods Manual, 2014).

1.2.4.2 CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA

La conductividad depende de la concentración total de iones presentes en una solución electrolítica, de la movilidad de cada uno de los iones disueltos, su valencia y de la temperatura a la que se hace la determinación. La conductividad eléctrica del extracto de saturación (CEe) es uno de los índices más difundidos para evaluar la concentración salina del suelo a nivel de laboratorio (NOM-021-SEMARNAT-2000, 2002). Esta salinidad designa una condición en la cual el agua del suelo contiene una sal soluble con una concentración probablemente nociva para los cultivos a través del potencial osmótico aumentado de la solución del suelo y la toxicidad de iones específicos. Estas sales solubles pueden estar presentes en el perfil original del suelo o pueden ser acumuladas en el agua de riego. La salinidad afecta en gran medida la absorción de agua por parte de las plantas y también puede afectar los procesos hidrológicos de infiltración y redistribución a través de cambios en la estructura y agregación inducidos por productos químicos. Los efectos secundarios de la nutrición mineral iónica y la toxicidad también pueden presentarse creando estrés adicional a la planta, más allá de los potenciales de agua (USDA, Soil Survey Field and Laboratory Methods Manual, 2014).

En general, los suelos salinos se definen como teniendo un contenido de sal > 0,1% o una CE de > 4 dS m⁻¹ del extracto de saturación; y los suelos sódicos se definen como teniendo un SAR de > 13. En la taxonomía del suelo, el ESP y la relación de adsorción de sodio (SAR) se han utilizado como criterios para horizontes nátricos (USDA, Soil Survey Field and Laboratory Methods Manual, 2014).

1.2.4.3 CARBONATOS Y BICARBONATOS

Otros aspectos importantes son las concentraciones de carbonatos y bicarbonatos presentes en el suelo. El carbonato es un constituyente natural en la mayoría de los suelos, encontrándose como carbonato soluble, principalmente como CaCO₃ o en minerales como calcio o dolomita. El carbonato a menudo se usa como mejorador de suelos ácidos, aunque también es un componente que, en algunos suelos, puede abatir los rendimientos de los cultivos, al limitar la respuesta a la fertilización e inclusive puede llegar a impedir el desarrollo de ciertas especies de interés agrario. Las deficiencias de

hierro, zinc, fósforo y nitrógeno pueden explicarse con la presencia excesiva de carbonatos (NOM-021-SEMARNAT-2000, 2002).

Además, el contenido de carbonatos de un suelo se utiliza para definir clases carbonáticas, granulométricas y calcáreas del suelo, así como para definir los horizontes cálcicos y petrocálcicos (USDA, Soil Survey Field and Laboratory Methods Manual, 2014).

Los carbonatos guardan relación con los bicarbonatos, que son constituyentes normales en los extractos acuosos de los suelos salinos. Son importantes debido a la tendencia de combinarse con los cationes de Ca y Mg. A medida que el Ca y el Mg disminuyen en la solución del suelo, la relación Na a (Ca + Mg) aumenta, favoreciéndose la adsorción del sodio por el suelo y el desarrollo de las condiciones de suelos sódicos (NOM-021-SEMARNAT-2000, 2002).

1.2.4.4 CLORUROS

Los cloruros proceden de la descomposición de la roca madre, principalmente de las rocas ígneas, la degradación de restos orgánicos y aportaciones realizadas por la lluvia. En general, su contenido en los suelos no es elevado debido a su gran movilidad, pero pueden darse casos de toxicidad, sobre todo en aquellas zonas donde la evaporación supera la lixiviación y no hay lavados de este anión (NOM-021-SEMARNAT-2000, 2002).

Los iones (Cl⁻) poseen la misma carga y casi el mismo tamaño que los iones hidroxilo y por eso, los primeros pueden sustituir a los segundos en las estructuras minerales (M. Thompson & R. Troeh, 1988)

Los cloruros (iones metálicos asociados con Cl⁻) son compuestos muy solubles. Por esta razón, en climas húmedos, se lava del suelo con facilidad. Los suelos ricos en sales solubles suelen contener gran cantidad de cloruros en solución y debido a su solubilidad, se desplazan hacia abajo cuando llueve, y hacia arriba cuando el agua se evapora en la superficie del suelo (M. Thompson & R. Troeh, 1988).

1.2.4.5 CALCIO

Uno de los cationes más importantes es el calcio, ya que la presencia de éste en el suelo es indispensable para lograr que los otros elementos, especialmente los

cationes, se pongan disponibles para la planta. Es conocido que el calcio debe cubrir el 60-70% de la saturación de los cationes del suelo (USDA, Soil Survey Field and Laboratory Methods Manual, 2014)

El calcio, en el suelo y en las plantas, se encuentra en forma de catión divalente (Ca^{++}) y existe una tendencia a que el porcentaje de calcio descienda gradualmente, conforme progresa la meteorización y el lavado. La pérdida de calcio de los suelos de regiones húmedas sería, sin duda, mucho más rápida si los iones Ca^{++} no fueran retenidos en los puntos de intercambio catiónico (M. Thompson & R. Troeh, 1988).

El calcio puede constituir más del 5% en peso de un suelo salino en regiones áridas, o apenas el 0.01% en peso de un suelo en zonas tropicales húmedas. La mayor parte de los suelos de regiones templadas húmedas contienen alrededor del 1 al 2% de calcio.

Las concentraciones más bajas de calcio ocurren en suelos muy lavados con capacidades de intercambio catiónico bajas.

El calcio intercambiable del suelo presenta una relación importante con el pH y con la disponibilidad de varios nutrientes. La cantidad de calcio y de otros cationes básicos desciende al aumentar la acidez y aumenta cuando el pH es más alcalino.

El calcio, al igual que otros nutrientes, se agota parcialmente en la zona que rodea a las raíces en crecimiento. De hecho, el calcio disuelto en la solución del suelo puede trasladarse por flujo de masa (mecanismo principal de transporte iónico) y por difusión, pero el calcio intercambiable posee muy poca movilidad (M. Thompson & R. Troeh, 1988).

1.2.4.6 MAGNESIO

El magnesio es un elemento nutritivo esencial para las plantas y se encuentra en contenidos menores al de Ca (0.15-0.75% de materia seca). Este nutriente forma

parte de la molécula de clorofila por lo que se encuentra íntimamente involucrado en la fotosíntesis. Cumple un rol en la síntesis de aceites y proteínas y la actividad de enzimática del metabolismo energético, así como en la regulación de la absorción de otros nutrientes (USDA, Soil Survey Field and Laboratory Methods Manual, 2014).

En el suelo, el magnesio está presente en tres fracciones:

- Magnesio en la solución del suelo (está en equilibrio con el magnesio intercambiable y está fácilmente disponible para las plantas).
- Magnesio intercambiable (fracción más importante para determinar el magnesio disponible). Esta fracción consiste en el magnesio sorbido a las partículas de arcilla y materia orgánica. Está en equilibrio con magnesio en la solución del suelo.
- Magnesio no intercambiable (componente de los minerales primarios en el suelo). El proceso de descomposición de los minerales en el suelo es muy lento, por lo tanto, esta fracción de magnesio no está disponible para las plantas.

Las plantas absorben el magnesio en su forma iónica Mg^{+2} , que es la forma de magnesio disuelto en la solución del suelo y esta absorción está dominada por los procesos de absorción y difusión.

Dentro de los factores que afectan la disponibilidad y absorción, se encuentra el bajo pH del suelo, bajas temperaturas, suelos con condiciones secas y altos niveles de elementos competitivos, tales como el potasio y el calcio. Estos últimos reducen la disponibilidad de magnesio. Bajo estas condiciones es mayor la probabilidad de encontrar una deficiencia de magnesio. Además, los suelos ácidos aumentan la tendencia de lixiviación de magnesio, debido a que tienen menos sitios intercambiables (Capacidad de Intercambio Catiónico inferior), aunado a esto, la solubilidad de elementos tales como el manganeso y aluminio aumenta, con lo que se reduce la absorción de magnesio por la planta (Smart Fertilizer Management, 2013)

1.2.4.7 NITRÓGENO

Entre los elementos que el vegetal toma del suelo, el nitrógeno es el de mayor importancia cuantitativa. Los principales roles del nitrógeno en la nutrición de las plantas

son como componente de la molécula de clorofila, de los aminoácidos, unidad estructural de las proteínas, de las moléculas de enzimas, vitaminas, hormonas y ácidos nucleicos, es esencial en la utilización de carbohidratos, estimula el desarrollo y la actividad radicular.

Las deficiencias de nitrógeno se pueden presentar en todo tipo de suelo, manifestándose en los vegetales por la aparición de color amarillento en las hojas más viejas o color amarillo-verdoso con tendencia a la caída de las mismas (C. Brady & R. Weil, 2000).

La tasa de crecimiento de las plantas, generalmente, es proporcional a la tasa a la cual se provee el nitrógeno. El contenido de nitrógeno en los suelos varía en un amplio espectro, pero valores normales en la capa de laboreo son del 0.2 al 0.7%. Estos porcentajes tienden a disminuir con la profundidad. Así mismo, el nitrógeno tiende a incrementar cuando disminuye la temperatura del suelo y al aumentar las precipitaciones atmosféricas (Costa Martín & Ocete Soto, 1999).

El ion amonio puede unirse a las partículas de arcilla y permanecer en el suelo, sin embargo, no sucede lo mismo con el ion nitrato, que con frecuencia es lavado por el agua, formando parte del lixiviado. De esta manera, la mayor parte del nitrógeno en el suelo se ha de hallar en los horizontes superiores y, como consecuencia, el nitrógeno puede drenarse fácilmente de los suelos cuando ocurre una perturbación (Costa Martín & Ocete Soto, 1999).

Para efectos analíticos, se determina el nitrógeno total para establecer la relación carbono/nitrógeno, aunque el nitrógeno inorgánico es la fracción realmente disponible para las plantas, y su contenido es generalmente menor al 10 % del nitrógeno total. Este nitrógeno inorgánico se encuentra principalmente bajo la forma aniónica (NO_3^-) y catiónica (NH_4^+) (C. Brady & R. Weil, 2000).

1.2.4.8 MATERIA ORGÁNICA

Los suelos se forman, por lo general, a partir de materiales originarios sin materia orgánica (m.o.). La materia orgánica fresca (biomasa muerta o necromasa) procedente de plantas, animales y microorganismos y sus productos de alteración son los que permiten explicar, principalmente, la presencia de m.o. en los suelos (Porta, et al., 2003). Así, los

materiales orgánicos encima y en la superficie del suelo pueden proporcionar el «amortiguamiento» físico contra el impacto de las gotas de lluvia y la insolación directa. La descomposición de las raíces muertas provee canales descendentes a través de los cuales el agua puede rápidamente alcanzar los niveles más bajos de la zona radical (FAO, Conservación de los recursos naturales para una Agricultura sostenible, 2005), y en general, contribuir para el desarrollo de la vegetación.

Dado que un suelo recibe nuevos aportes de materia orgánica a lo largo del tiempo, en un momento determinado, la m.o. estará constituida por un conjunto muy heterogéneo de sustancias en distintos estadios de alteración, por lo que su composición química será difícil de precisar. En general la m.o. de un suelo se compone de:

- Materia orgánica fresca (m.o. no humificada). Integrada por:
 - Biomasa vegetal senescente procedente de la parte aérea de la vegetación y raíces, así como de restos, deyecciones y secreciones de animales.
 - Biomasa microbiana, microfauna menor a $5 \times 10^{-3} \mu\text{m}$. Está muy poco o nada alterada y no se encuentra unida a la fracción mineral.
- Humus. Constituido por sustancias resultantes de la alteración de productos sintetizados por las plantas y los microorganismos. Presenta uniones débiles con la fracción mineral.
 - Materias orgánicas heredadas (sustancias no húmicas, biomacromoléculas con características químicas reconocibles). La mayoría de estas sustancias son fácilmente biodegradables por enzimas específicas, por lo que permanecerán poco tiempo en el suelo.
 - Materias orgánicas humificadas (humus en sentido estricto, materiales que han perdido las características químicas de sus precursoras). Suponen entre un 60 y 80% de la m.o. del suelo. Son el producto de la alteración de m.o. por acción microbiana y por procesos abióticos. Se trata de una mezcla compleja de compuestos orgánicos de composición diversa.

Entre los factores que influyen en el contenido de materia orgánica, se encuentran:

- Vegetación. Determina la cantidad de necromasa aportada y su calidad. Los residuos de plantas varían según el ecosistema de que se trate.
- Clima. Condiciona el tipo de especies vegetales, la producción de biomasa y el grado de actividad microbiana.
- Organismos del suelo. Intervienen en la alteración de la m.o. y en su mezcla con la materia mineral.
- Posición en una ladera. Efecto solana-umbría.
- Drenaje. La materia orgánica tiende a acumularse en suelos mal aireados en los que falta oxígeno; en aquellos que están permanentemente saturados de agua se puede formar un suelo orgánico.
- Textura. Los suelos de textura arcillosa pueden presentar mayor contenido de m.o. al retener más agua y nutrientes, favoreciendo la producción de biomasa.
- Estructura. Guarda relación con la porosidad, aireación y enraizamiento.

Otro aspecto importante, es que a partir del contenido de m.o. se puede determinar el Carbono orgánico presente en el suelo, por lo que el análisis de materia orgánica se convierte en parte indispensable para definir las características de un suelo.

Las funciones del suelo se ven directamente afectadas por la cantidad y la calidad de materia orgánica que contiene. Por ello, como varios autores lo mencionan (Gregorich y Carter, 1997; Franzluebers, 2002; Baldock y Nelson, 2000), la m.o. es un constituyente y un indicador de la calidad del suelo. La materia orgánica tiene alta incidencia sobre propiedades físicas, químicas y biológicas y da lugar a varias interrelaciones.

- Propiedades físicas:
 - Estructuración.
 - Sellado y encostramiento de la superficie del suelo.
 - Porosidad y aireación.

- Movimiento del agua en el suelo.
- Capacidad de retención de agua disponible para las plantas (CRAD).
- Prevención de los procesos erosivos, por efecto combinado sobre la estabilidad de la estructura, el sellado y la infiltración.
- Propiedades químicas:
 - Procesos de intercambio iónico: elevada superficie específica y CIC.
 - Capacidad tampón frente a los cambios de pH.
 - Estabilización de nutrientes en forma orgánica.
 - Formación de complejos organominerales.
 - Papel depurador frente a vertidos, al regular la movilidad y disponibilidad de productos potencialmente tóxicos.
- Propiedades biológicas:
 - Interviene en la formación del suelo.
 - Constituye una reserva de energía metabólica.
 - Fuente de macro y micronutrientes, que son liberados de forma progresiva.
 - Estimula e inhibe la actividad enzimática, según el caso.
 - Contribuye a la resiliencia de los ecosistemas, al disminuir o inhibir los efectos de las perturbaciones ambientales.
- Interacciones:
 - Condiciona el funcionamiento biogeoquímico de los ecosistemas.
 - Aumenta y permite definir la calidad de un suelo.
 - Secuestro de carbono de muchos suelos.
 - En suelos agrícolas, para mejorar la capacidad de soportar la producción de alimentos y biomasa (Porta, *et al.*, 2003).

1.2.4.9 RELACIÓN C/N

La relación entre el contenido de carbono orgánico (C) y el de nitrógeno (N), C/N, determina la tasa a la cual el nitrógeno estará disponible para las plantas. El valor de esta relación es muy alto para la m.o. fresca y va disminuyendo a medida que la m.o. se transforma en humus (Porta, *et al.*, 2003).

La relación C/N indica también la potencialidad del suelo para transformar la materia orgánica en nitrógeno mineral. De manera general se considera que una relación C/N entre 10 y 12 produce una correcta liberación de nitrógeno, mientras que valores por encima o por debajo de esta cifra, provocan liberaciones muy escasas o excesivas.

La relación C/N es el factor principal para determinar qué proceso ocurre en el suelo con la acción microbiana, ya que puede mineralizar o inmovilizar el nitrógeno. La cantidad de nitrógeno que necesita la población microbiana es proporcional a la cantidad de carbono que ingresa en ella.

En otra literatura se maneja que una relación C/N alrededor de 32/1 constituye el punto de equilibrio para la descomposición de los materiales orgánicos en unas semanas. Si la relación es mayor, parte del nitrógeno del suelo debe ser inmovilizado; si es menor, permite la ocurrencia de una cierta mineralización al tiempo que se descompone la materia orgánica. Cuanto mayor es la relación C/N más largo es el periodo de inmovilización neta. Cuanto menor es la relación se realiza antes la mineralización del nitrógeno (M. Thompson & R. Troeh, 1988).

1.2.4.10 ACIDEZ EXTRAÍBLE

La acidez extraíble corresponde a la suma de H^+ y Al^{3+} ocupando posiciones de intercambio al pH del suelo (Casanova, 1999).

La acidez extraíble liberada del suelo a partir de la adicción de una solución de $BaCl_2$ – TEA a pH 8.2 incluye toda la acidez generada por el reemplazamiento de H^+ y Al^{3+} . El servicio de conservación de suelos adopto un pH de 8.2 porque éste aproxima el pH aproximado de un suelo que contiene $CaCO_3$ libre en equilibrio con el contenido normal de CO_2 en la atmosfera (0.03%). Las unidades de medida son centimoles por kilogramo

(cmol/kg) del suelo, que son equivalentes a miliequivalente por 100 gramos (meq/100 g) del suelo (USDA, Soil Survey Field and Laboratory Methods Manual, 2014).

El aluminio y el hidrógeno, dos cationes adsorbidos en el suelo, son ampliamente responsables de la acidez. La mayor parte de estos dos elementos está ligada fuertemente con la materia orgánica y las arcillas minerales. Sin embargo, bajo condiciones muy ácidas, una parte del aluminio se convierte en soluble y es retenida por los coloides del suelo como iones intercambiables de Al^{3+} . Este aluminio adsorbido contribuye a la acidez del suelo proporcionando iones que son hidrolizados para producir iones de H^+ (C. Brady & R. Weil, 2000).

El hidrógeno y el aluminio están presentes en dos formas en el suelo: 1) fuertemente sostenidos a los sitios dependientes del pH y 2) asociados a cargas negativas permanentes en los coloides (intercambiable). Solo los iones intercambiables tienen un efecto inmediato en el pH del suelo (C. Brady & R. Weil, 2000).

Por tanto, investigadores han sugerido tres tipos de acidez:

- 1) Acidez activa: debida a los iones H^+ en la solución del suelo, se mide por el pH.
- 2) Acidez intercambiable o extraíble: implica los iones de aluminio y de hidrógeno que son fácilmente intercambiables por otros cationes en una solución simple de sales sin buffer.
- 3) Acidez residual: es asociada con las grandes cantidades de iones de Al^{3+} , H^+ y $\text{Al}(\text{OH})_x$ que son retenidos en formas no intercambiables por materia orgánica y arcillas de silicato (C. Brady & R. Weil, 2000).

1.2.4.11 CAPACIDAD DE INTERCAMBIO CATIONICO

El intercambio iónico es un proceso reversible mediante el cual un catión o anión de la fase sólida se intercambia con otro catión o anión en la fase líquida. Si dos fases sólidas están en contacto, el intercambio iónico también puede tener lugar entre las dos superficies. En la mayoría de los suelos agrícolas y forestales, el intercambio catiónico se considera generalmente más importante que el intercambio aniónico (USDA, Soil Survey Field and Laboratory Methods Manual, 2014).

La capacidad de intercambio catiónico (CIC) es una medida de la cantidad de cationes fácilmente intercambiables que neutralizan las cargas negativas en el suelo (USDA, Soil Survey Field and Laboratory Methods Manual, 2014), bajo condiciones de temperatura, presión, composición de la fase líquida y una relación de masa-solución dada. Está estrechamente vinculada a su fertilidad y depende de los coloides inorgánicos y del contenido de m.o. (Martínez H., *et al.*, 2008). Se considera que un mol de carga positiva equivale a 6.02×10^{23} cargas de cationes adsorbidos (Porta, *et al.*, 2003).

La CIC mide la cantidad total de cargas negativas por unidad de peso del material y se expresa comúnmente en unidades de miliequivalentes por 100 g de suelo (meq 100/g) o centimoles por kg de suelo (cmol/kg). El término "equivalente" se define como "1 gramo de peso atómico de hidrógeno o la cantidad de cualquier otro ion que combinará o desplazará esta cantidad de hidrógeno". El peso miliequivalente de una sustancia es una milésima parte de su peso atómico. Dado que el peso equivalente de hidrógeno es de aproximadamente 1 gramo, el término "miliequivalente" puede definirse como "1 miligramo de hidrógeno o la cantidad de cualquier otro ion que se combine o desplace" (USDA, Soil Survey Field and Laboratory Methods Manual, 2014).

El intercambio de cationes es una reacción reversible en la solución del suelo, dependiente de las cargas negativas de los componentes del suelo que surgen de sitios cargados permanentemente o que dependen del pH en superficies de materia orgánica y coloides minerales (USDA, Kellogg Soil Survey Laboratory Methods Manual, 2014), es decir, la mayoría de los suelos tienen una carga permanente y otra carga que varía con el pH, observándose un aumento de la CIC con el pH, por lo que la CIC total se mide a pH 8,2, de acuerdo a Tan y Dowling (1984). Se considera que la CIC permanente proviene de la fracción arcilla, mientras que la CIC variable depende de las sustancias húmicas. Los coloides inorgánicos prácticamente no varían en un suelo en particular, con valores de CIC que fluctúan entre 2 y 150 cmol/kg. Por otro lado, los coloides orgánicos, son altamente dependientes del manejo y pueden tener una CIC que supera los 200 meq/100 g de suelo (Martínez H., *et al.*, 2008).

1.2.4.11 OTROS ASPECTOS RELACIONADOS

Dentro de los conceptos vinculados al estudio de propiedades químicas, cabe destacar la importancia que tiene la preparación de la pasta saturada.

Una pasta de suelo saturado es una mezcla particular de agua y suelo, con ciertas características como el brillo al reflejar la luz, el flujo ligero y el hecho de resbalar libremente desde una espátula, a excepción de suelos con alto contenido de arcilla. Esta relación suelo-agua se usa porque representa la más baja relación reproducible, de la cual puede obtenerse extracto por vacío para el análisis de cationes y aniones solubles, además de que esta relación con frecuencia con el contenido de humedad. Después de la preparación de una pasta de saturación se obtiene un extracto acuoso usado en los análisis químicos correspondientes (NOM-021-SEMARNAT-2000, 2002).

1.2.5 CARACTERÍSTICAS Y PROPIEDADES HIDROLÓGICAS

1.2.5.1 CAPACIDAD DE CAMPO

Dentro de las características hidrológicas a analizar, se encuentra la capacidad de campo, la cual se refiere a la cantidad relativamente constante de agua que contiene un suelo saturado después de 48 horas de drenaje. El drenaje ocurre por la transmisión del agua a través de los poros mayores de 0,05 mm de diámetro; sin embargo, la capacidad de campo puede corresponder a poros que varían entre 0,03 y 1 mm de diámetro (FAO, Optimización de la humedad del suelo para la producción vegetal, 2005).

La capacidad de campo (CC) de un suelo también se ha definido como la cantidad máxima de agua que puede ser retenida en un suelo en contra de la fuerza de la gravedad, después de un riego o lluvia que ha humedecido todo el suelo. En este punto el drenaje interno es insignificante (SSSA, 1986). Se estima a una tensión de 33 kPa (0.33 Bar) y al igual que el punto de saturación, también se ve afectado por el tipo y contenido de arcillas y materia orgánica, no es afectado por la salinidad ni por el contenido de gravas (Saxton, K., & Rawls, W. 2006).

El concepto de Capacidad de Campo se aplica únicamente a suelos bien estructurados donde el drenaje del exceso de agua es relativamente rápido; si el drenaje ocurre en

suelos pobremente estructurados, por lo general continuará durante varias semanas y este tipo de suelos de estructura tan pobre raramente tiene una Capacidad de Campo claramente definida (FAO, Optimización de la humedad del suelo para la producción vegetal, 2005).

1.2.5.2 PUNTO DE MARCHITAMIENTO

El punto de marchitamiento se refiere al contenido de agua de un suelo que ha perdido toda su agua a causa del cultivo y, por lo tanto, el agua que permanece en el suelo no está disponible para el mismo. En esas condiciones, el cultivo está permanentemente marchito y no puede revivir cuando se le coloca en un ambiente saturado de agua (FAO, Optimización de la humedad del suelo para la producción vegetal, 2005).

En la práctica, se utiliza este concepto para indicar el límite inferior del intervalo de agua disponible en el suelo (SSSA, 1986).

1.2.5.3 CAPACIDAD DE AGUA DISPONIBLE

Otra propiedad importante es la capacidad disponible de agua, también conocida como cantidad de agua fácilmente accesible o humedad aprovechable, y se refiere a la cantidad de agua disponible para el crecimiento de las plantas y se encuentra entre la Capacidad de Campo (CC) y el Punto de marchitamiento (PM). La CC representa el límite superior o 100% de disponibilidad de la humedad del suelo. El PM es el límite inferior de esta disponibilidad o 0% (FAO, Optimización de la humedad del suelo para la producción vegetal, 2005).

Los suelos de textura fina tienen límites más amplios de agua disponible que los suelos de textura gruesa (SSSA, 1986).

1.2.5.4 SATURACIÓN

Por último, la saturación representa el contenido de agua del suelo cuando prácticamente todos los espacios están llenos de agua, es decir, la cantidad máxima de agua que un suelo puede retener. En los suelos bien drenados es un estado temporal ya que el exceso

de agua drena de los poros grandes por influencia de la gravedad para ser reemplazada por aire (FAO, Optimización de la humedad del suelo para la producción vegetal, 2005).

Este parámetro se ve afectado por el tipo y contenido de arcilla, así como por el tipo y contenido de materia orgánica, no es afectado por la salinidad ni por el contenido de gravas. El punto de saturación de un suelo va de menos del 10% para suelos arenosos, hasta 150% para suelos muy arcillosos y/o con muy alto contenido de materia orgánica (SSSA, 1986).

1.2.5.5 CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA

La conductividad hidráulica (K) es la capacidad del agua para moverse dentro de la matriz del suelo conducida por el potencial matricial y gravitacional (cm/s; in/hr), dependiente de la textura del suelo y del contenido hídrico (Saxton, K., & Rawls, W. 2006).

En relación a la conductividad hidráulica cabe destacar que:

- Expresa la capacidad de un medio poroso (suelo) para transmitir el agua. La resistencia del suelo al flujo de agua es debida a las fuerzas entre las moléculas del líquido y entre éste y las paredes de los poros.
- Cuando mayor es la tortuosidad del sistema de poros, menor es la conductividad hidráulica.
- Es función, entre otros factores, del contenido de agua y del potencial matricial.
- En condiciones de flujo saturado es constante con el tiempo, si no hay cambios en la estructura del suelo.
- La medida de la conductividad hidráulica a distintas profundidades en un suelo permite poner de manifiesto diferencias en la capacidad de transmisión de agua por parte de los distintos horizontes debido a la heterogeneidad del suelo (Porta, *et al.*, 2003).

Conductividad hidráulica en suelos totalmente saturados (K_s): El movimiento del agua en el suelo se controla por dos factores: la resistencia de la matriz del suelo para fluir agua, y las fuerzas que actúan en cada elemento o unidad de agua del suelo. El flujo saturado ocurre cuando la presión del agua de poros es positiva; es decir, cuando el potencial matricial del suelo es el cero. En la mayoría de suelos esta situación tiene lugar

cuando aproximadamente el 95% del espacio del poro total está lleno con agua. El restante 5% está lleno con el aire atrapado (Donado Garzón & Colmenares Montañez, 2004)

1.2.5.6 POTENCIAL HÍDRICO

La energía potencial del agua retenida se designa como potencial de agua o potencial hídrico y está representada por:

$$\Psi_{H_2O} = \Psi_G + \Psi_P + \Psi_O + \Psi_M$$

Donde:

Ψ_G = potencial gravitacional

Ψ_P = potencial de presión

Ψ_O = potencial osmótico

Ψ_M = potencial matricial (Bustamante, 1986)

Potencial gravitacional: se debe a la altura geométrica del punto considerado respecto al plano de referencia (Ingeniería rural, 2008). Si el nivel de referencia está por encima, el potencial gravitacional es negativo, pero si el nivel de referencia está por debajo dicho potencial es positivo (Bustamante, 1986).

Potencial de presión: solo aparece en suelos saturados y se debe a la presión ejercida por el agua que satura el suelo sobre el punto considerado (Ingeniería rural, 2008). La presión a la que está sometida el agua del suelo depende de los cambios posibles en la presión del aire del ambiente; como la presión atmosférica permanece generalmente constante, este efecto es depreciable en la variación del potencial de presión del agua del suelo. En suelo saturado la fase líquida tiene una presión hidrostática mayor que la atmosférica y por lo tanto el potencial se considera positivo, en la superficie de la fase líquida el potencial es cero y el agua que se levanta por encima del nivel de la tabla de agua por capilaridad su potencial es negativo (Bustamante, 1986).

Potencial osmótico: se debe a las diferencias de concentración a ambos lados de las membranas celulares de las raíces de las plantas (Ingeniería rural, 2008). La diferencia en potencial osmótico origina movimiento del agua entre dos puntos; sin embargo la concentración de sales en un perfil de suelo es aproximadamente similar por el proceso de difusión y la diferencia en la mayoría de los casos es despreciable. Desde el punto de vista del trabajo que debe efectuar la planta para extraer la humedad del suelo es importante, considerando que la presencia de sales en el agua del suelo baja su potencial (Bustamante, 1986).

Potencial matricial: es el resultado de la acción integrada de las fuerzas de adsorción y capilaridad. Esas fuerzas atraen y retienen el agua en el suelo reduciendo su energía potencial por debajo de aquella del agua libre. La capilaridad es el resultado de la tensión superficial del agua y su ángulo de contacto con la fase sólida (Bustamante, 1986). Este valor es nulo en suelos saturados, presentándose solo en suelos subsaturados. Su valor es negativo ya que la presión que origina se opone a la expulsión de agua del suelo. Cuanto más seco está un terreno, más bajo es el potencial mátrico y mayor será la presión necesaria para extraer agua (Ingeniería rural, 2008).

1.2.6 SOFTWARE DE SIMULACIÓN

Frecuentemente, el análisis hidrológico involucra la evaluación de la infiltración del suelo, el almacenaje y la relación agua-suelo-planta. Para poder definir el efecto del agua del suelo es necesario estimar la curva de retención hídrica y la conductividad hidráulica (Saxton, K., & Rawls, W. 2006).

Las mediciones de campo y laboratorio son dificultosas, costosas y a menudo imprácticas para muchos análisis hidrológicos. Por lo tanto Las correlaciones estadísticas entre la textura del suelo, la curva de retención hídrica y la conductividad hidráulica pueden proveer estimaciones suficientemente correctas para muchos análisis y toma de decisiones. En este sentido, a la hora de trabajar sobre un suelo es bastante común poder contar con valores de textura, pero normalmente no es fácil contar con curvas de retención de humedad ni con mediciones de infiltración y conductividad hidráulica. Para estas situaciones, el programa "Soil Water Characteristics" resulta una herramienta sumamente útil ya que estima el almacenaje, la curva de retención hídrica y la transmisión de agua del horizonte de un perfil de suelo mediante funciones de pedotransferencia,

utilizando valores conocidos de textura, materia orgánica, salinidad y grado de compactación (Saxton, K., & Rawls, W. 2006).

El software fue desarrollado por el Dr. Keith E. Saxton, perteneciente al servicio de Investigación de Agricultura del USDA y por el Dr. Walter Rawls, del Laboratorio de detección remota e hidrología de USDA-ARS en cooperación con el Departamento de Ingeniería de Sistemas Biológicos de la Universidad del estado de Washington.

Dicho programa contiene una interface gráfica que, a partir de los contenidos de arena y arcilla, provee las relaciones del contenido hídrico y tensión (punto de marchitez, capacidad de campo y saturación), así como la conductividad hidráulica saturada (K_s). Además, basándose en el contenido de humedad, también se calcula la conductividad hidráulica (K), el potencial matricial y el osmótico + matricial.

Las ecuaciones del modelo fueron desarrolladas por medio de correlaciones de una extensa base de datos de 1722 muestras provista por el Nacional Soil Survey Laboratory del NRCS del USDA (Saxton, K., & Rawls, W. 2006).

Las soluciones del modelo son válidas para todas las texturas excepto para aquellas con contenidos de arcilla superior al 60%. Soil Water Characteristics permite incluir variaciones en el contenido de materia orgánica, % de gravas (volumétrico o gravimétrico), nivel de salinidad y nivel de compactación. Cada una de estas 4 variables modifica el resultado de la solución y tiene rangos máximos y mínimos de variación para mantener la validez de dicho resultado (Saxton, K., & Rawls, W. 2006).

Es importante aclarar que cuando se utiliza una rutina de estimación como este software, los resultados representan la media estadística de muchas muestras y métodos auxiliares y por lo tanto se “aproximan” a las características de un suelo específico. Si no hay datos locales para contrastar los resultados, las estimaciones del programa constituyen una razonable representación de los datos (Saxton, K., & Rawls, W. 2006).

1.2.7 INFLUENCIA DE LAS ACTIVIDADES ANTROPOGÉNICAS EN EL CERRO DE AMALUCAN

La zona de estudio, declarada como reserva ecológica en la ciudad de Puebla, está ubicada como ya se mencionó en el noreste de la ciudad de Puebla, dentro de la zona centro. Debido a que la zona de los alrededores se clasifican como Uso mixto-densidad alta, el cerro de Amalucan tiene una gran influencia antropogénica.

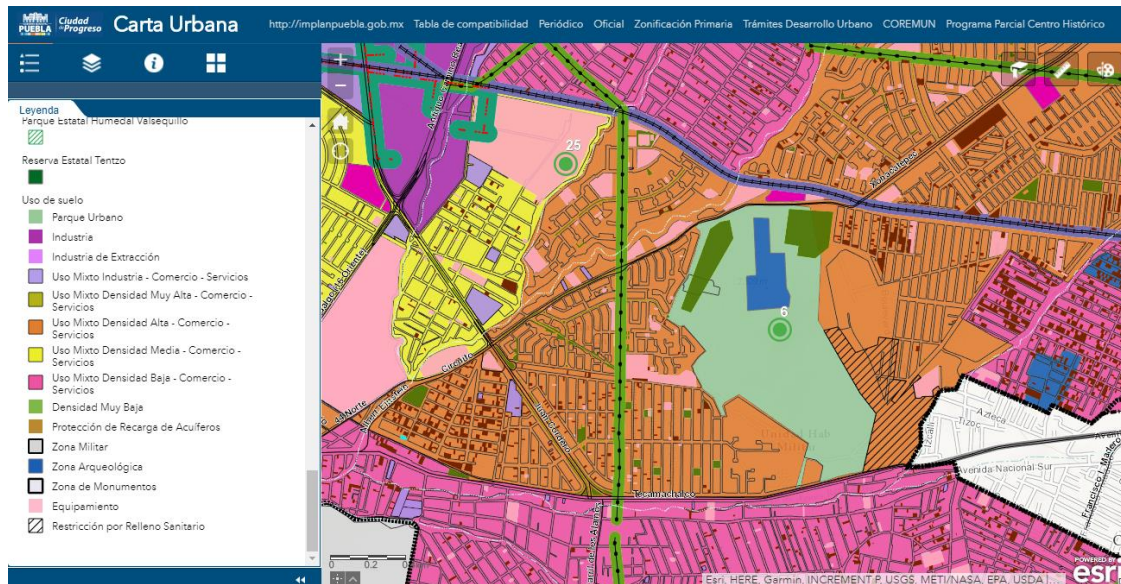


Figura 9. Uso de suelo en la zona del cerro de Amalucan. Carta urbana del municipio de Puebla, 2017

Dentro de las principales actividades que se realizan en la zona de estudio, se encuentran las deportivas y de recreación; se ha observado a personas realizando diversos ejercicios como correr, caminar, jugar futbol, andar en bicicleta y ejercicios de relajación, así como pasear a sus mascotas o tener un día de campo en familia.

Se sabe que también se realizan actividades de reforestación, tratando de aumentar el número de especies de pinos, sin embargo se han distribuido de manera irregular con distancias de separación muy pequeñas para el correcto crecimiento de estos pinos. Véase figura 10.



Figura 10. Pinos plantados en el cerro de Amalucan a escasos centímetros de distancia entre ellos.

También se observan restos de cenizas en diversas partes del cerro, ya que se realiza la quema del pastizal continuamente, como se observa en la figura 11. Esta actividad se realiza para controlar posibles incendios en periodos de sequía, sin embargo no existe una regulación por parte de las autoridades.



Figura 11. Restos de quema de pastizal en el cerro de Amalucan.

A un costado del cerro de Amalucan, en la parte este, se encuentra una hacienda donde se realizan eventos sociales, por lo que el cerro de Amalucan es bastante concurrido los fines de semana principalmente.

Las personas también usan el cerro como un medio para trasladarse a sus trabajos y ahorrar tiempo.

Por las veredas que existen en el cerro se observan algunos restos de defecación de animales, obviando la realización de actividades de pastoreo, esto se puede observar en la figura 12.



Figura 12. Restos fecales de animales en el cerro de Amalucan.

PROYECTO PARQUE DE AMALUCAN

Antes de comenzar con la redacción de esta tesis, se desconocía acerca de la veracidad del proyecto en el cerro de Amalucan, ya que había cierta incertidumbre de si en verdad se llevaría a cabo debido a la oposición de grupos de vecinos. Durante el periodo de toma de muestras y determinaciones en el laboratorio, no se consideraba el hecho de la

construcción del parque, por lo que para efectos de este documento, no se tomarán en cuenta las implicaciones que tendrá esta obra en las propiedades del suelo, sin embargo, es de importancia mencionar lo que contempla el proyecto, ya que es un aspecto social que cambiará las condiciones actuales del sitio.

La información presentada a continuación fue tomada de publicaciones del subsecretario de Obra Pública y Comunicaciones, Xabier Albizuri Morett, quien a través de vía twitter ha compartido avances de este proyecto.

Señala que de la superficie total, se tomarán 6.1 hectáreas para la construcción, sin alterar las zonas declaradas como vestigios arqueológicos. Se construirán canchas, módulos infantiles, senderos y accesos controlados, así como reforestar con al menos dos mil árboles de especies como encino, clavo, jacaranda, ficus verde, laurel de la India, sauce llorón, fresno y pino patula, que sustituirán a 400 eucaliptos. También se contempla la construcción de vasos reguladores para captar el agua pluvial y prevenir la erosión de los suelos, así como de tecorrales y dedos verdes.

En las imágenes siguientes se pueden observar los renders para el proyecto, así como una muestra de que empezó la primera etapa de reforestación el 3 de octubre de 2017.



Figura 13. Proyecto Parque de Amalucan.



Figura 14. Render de la construcción de módulos y senderos en el cerro de Amalucan.



Figura 15. Render de la construcción de un lago artificial.



Figura 16. Render de la construcción de áreas de esparcimiento.



Figura 17. Render de la construcción de un módulo infantil.



Figura 18. Primera etapa de reforestación (03/10/17)

CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA

Para la elaboración del presente proyecto, se tomaron como base para el muestro y determinaciones de las propiedades del suelo, la Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2001, que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestro y análisis, así como el manual de suelos y métodos de laboratorio del Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA, 2014).

Para la determinación de características y propiedades hidrológicas, se tomó en cuenta el manual de Saxton y Rawls.

2.1 LOCALIZACIÓN DEL SITIO

Como ya se ha mencionado, la zona de estudio para el presente trabajo es el Cerro de Amalucan, en el cual se localizaron 25 puntos mediante la herramienta Google Earth, para posteriormente realizar el muestreo.

Se realizaron 8 hileras de tres puntos de manera descendiente a lo largo de la pendiente del cerro, con una distancia aproximada de 100 m., completando así 24 puntos. El último punto se localizó en la parte más alta del cerro.

En la tabla 6 se muestran las coordenadas de cada punto, así como la altitud.

Tabla 6. Coordenadas de localización de los puntos de muestreo.

Punto de muestreo	Coordenada eje X	Coordenada eje Y	Altitud (msnm)
M1	14Q 0590409	2106769	2289
M2	14Q 0590359	2106780	2280
M3	14Q 0590273	2106825	2248
M4	14Q 0590407	2106654	2291
M5	14Q 0590341	2106614	2267
M6	14Q 0590233	2106570	2241
M7	14Q 0590507	2106563	2296
M8	14Q 0590427	2106483	2270

Punto de muestreo	Coordenada eje X	Coordenada eje Y	Altitud (msnm)
M9	14Q 0590377	2106426	2253
M10	14Q 0590640	2106605	2293
M11	14Q 0590697	2106569	2279
M12	14Q 0590743	2106526	2265
M13	14Q 0590644	2106675	2297
M14	14Q 0590719	2106666	2284
M15	14Q 0590798	2106598	2264
M16	14Q 0590617	2106740	2300
M17	14Q 0590727	2106773	2280
M18	14Q 0590794	2106793	2263
M19	14Q 0590599	2106802	2297
M20	14Q 0590640	2106878	2276
M21	14Q 0590683	2106956	2261
M22	14Q 0590526	2106797	2298
M23	14Q 0590502	2106886	2281
M24	14Q 0590473	2106978	2259
M25	14Q 0590543	2106709	2307

Tabla 6 Continuación. Coordenadas de localización de los puntos de muestreo.

En la figura 19 se muestra en el mapa la distribución de los 25 puntos de muestreo.

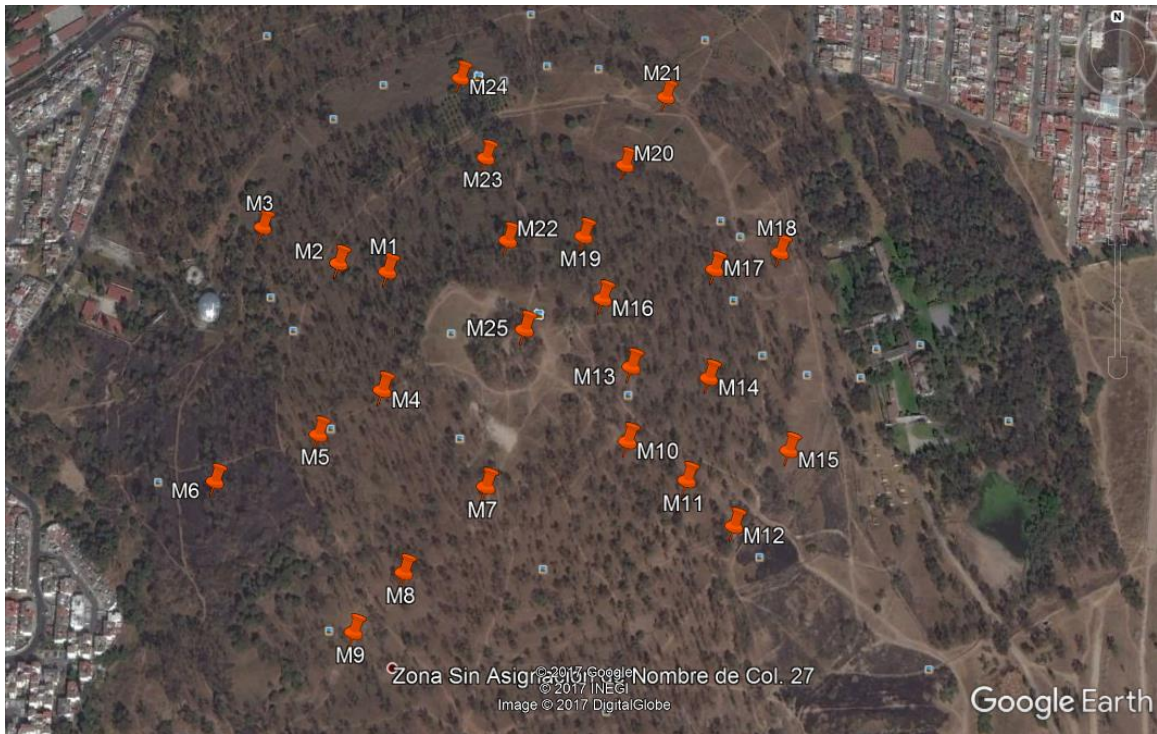


Figura 19. Localización de los puntos de muestreo en el cerro de Amalucan.

2.1 MUESTREO Y EVALUACIÓN DE CONDICIONES DE SUPERFICIE

Ubicados los puntos de manera virtual (mediante la distribución sistemática de puntos de muestro), se acudió al cerro de Amalucan los días 22, 23 y 24 de febrero de 2017 para localizarlos físicamente con ayuda del GPS “GARMIN eTrex Vista”.

Se tomaron muestras simples de cada punto con ayuda de palas y bolsas, siguiendo el procedimiento AS-01 marcado en la Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2001. Se tomaron aproximadamente 2 kg de suelo homogéneo del perfil de profundidades determinadas de 25 cm, aunque algunas se tomaron a menor profundidad por la dificultad con el material rocoso presente.

Las condiciones del sitio al momento del muestreo fueron similares, ya que aunque no se realizó el muestreo de los 25 puntos en un mismo día, si se realizaron con un día de diferencia.

En esta etapa de muestreo, también se realizó la observación del perfil de suelo y condiciones de superficie, como su posición fisiográfica, pendiente del terreno, y condiciones de erosión, así como la determinación de elementos gruesos. Ver figura 20.



Figura 20. Vista del perfil de suelo de uno de los puntos donde se observan elementos gruesos.

Cabe destacar que el suelo no estaba completamente seco al momento del muestreo, se presentaron signos de humedad debido a que en días anteriores hubo ligeras precipitaciones. De acuerdo a CONAGUA, las precipitaciones en el mes de febrero en Puebla fueron de 8mm, como se puede observar en las figura 21.

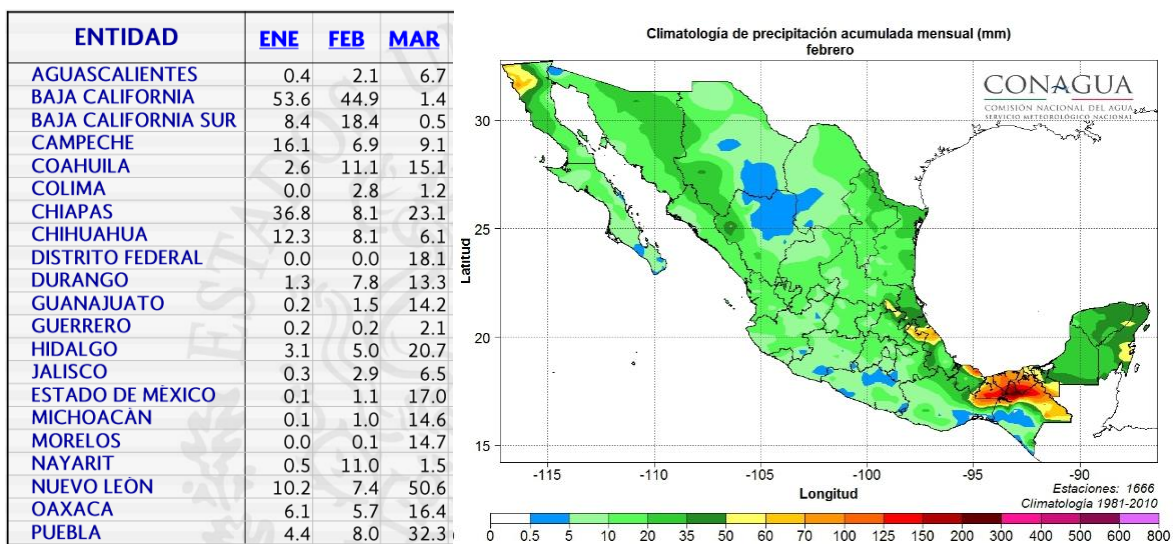


Figura 21. A la izquierda, precipitaciones en mm de algunas entidades federativas del país durante los primeros meses del 2017. A la derecha, mapa de precipitaciones acumuladas hasta 2017 en el país (CONAGUA).

2.2 PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS

Siguiendo el método AS-01 de la Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2001 se llevó a cabo el traslado, recepción, registro, secado, molienda, tamizado y almacenamiento de las 25 muestras.

Como se mencionó anteriormente, se utilizaron bolsas de plástico para trasladar las muestras del sitio al laboratorio. Fue indispensable cuidar las condiciones externas para que no se alterara la composición de las muestras, principalmente la humedad y el calor.

En el laboratorio se prosiguió a la identificación y registro de las muestras y posteriormente al secado, para lo cual se emplearon charolas de aluminio extendidas. En estos recipientes se colocaron las muestras con su respectiva identificación y se dejaron secar al aire libre con el propósito de eliminar la humedad, como se muestra en la figura 22.

Una vez secas, las muestras fueron sometidas a un proceso de molienda mediante el uso de un mortero y pistilo con el fin de lograr la homogeneización del tamaño de las partículas. Anticipadamente se retiraron las rocas y el material orgánico visible.

El suelo molido se hizo pasar por un tamiz de acero inoxidable de abertura 2 mm (malla número 10), ya que es el grado de fineza conveniente para la mayoría de los análisis requeridos.

Se separaron 1.5 kg de suelo aproximadamente para la realización de los análisis físicos y químicos y se almacenó en frascos de plástico completamente cerrados y debidamente identificados.



Figura 22. Preparación de muestras. Secado y molienda.

2.3 DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES FÍSICAS

2.3.1 PROFUNDIDAD DEL SUELO

La profundidad del suelo fue medida con un flexómetro después de realizar el corte transversal de donde fueron tomadas las muestras. La distancia que se determinó para coleccionar una muestra homogénea fue de 25 cm, tal como se observa en la figura 23.



Figura 23. Medida de la profundidad del perfil al momento de toma de muestra.

2.3.2 ELEMENTOS GRUESOS

La proporción de elementos gruesos se estimó visualmente y se comparó con la figura 24 que proporciona la FAO para propósitos de descripción de suelos.

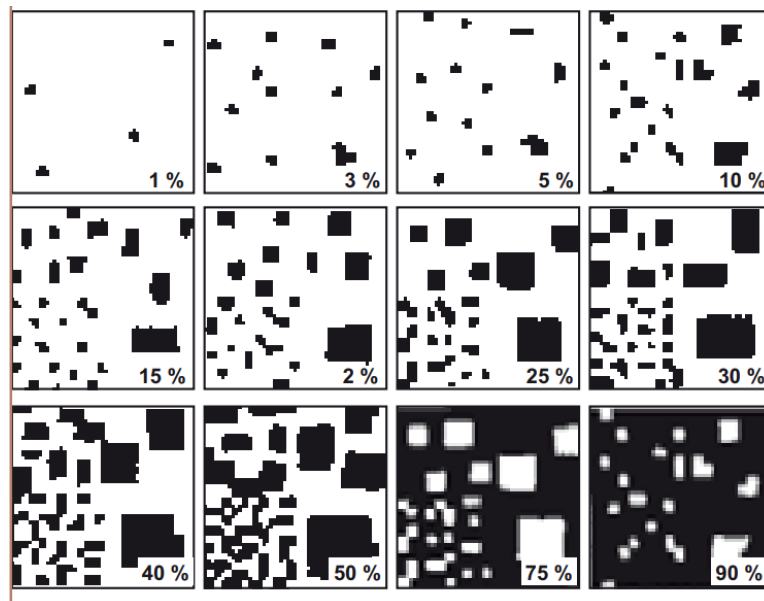


Figura 24. Clave para la estimación de fragmentos rocosos. FAO

2.3.2 ESTADO DE HUMEDAD

Para la determinación de la humedad del suelo, se tomó de referencia el MÉTODO AS-05 de la Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000

El método se basa en la medición o determinación de la cantidad de agua expresada en gramos que contiene una muestra de suelo. La determinación de la masa de agua se realiza por la diferencia en peso entre la masa de suelo húmedo y la masa de suelo seco.

Para esta determinación fue necesario tomar una muestra por separado de cada punto (50 gramos aproximadamente) y trasladarlas lo más pronto posible al laboratorio en recipientes de plástico sellados herméticamente con parafilm para evitar las pérdidas de humedad.

Se colocaron las muestras en charolas de aluminio, limpias e identificadas previamente, como se muestra en la figura 25. Después se pesó cada charola con el suelo húmedo y se registró su peso para posteriormente introducir las en el horno de convección mecánica a una temperatura de 105 °C.

Pasadas 24 horas, se sacaron las charolas de la estufa y se colocaron en el desecador de vacío hasta su enfriamiento. Se pesaron las charolas con las muestras secas y se introdujeron nuevamente a la estufa durante una hora, se enfriaron en el desecador y se repitió el procedimiento hasta obtener peso constante.



Figura 25. Preparación de la muestra para someterla a secado en estufa.

2.3.3 COLOR

El método utilizado para la determinación del color de las muestras de suelo fue el AS-22 de la NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-021-SEMARNAT-2000, el cual se basa en el método de la Tabla Munsell para la determinación del color de los suelos minerales y orgánicos. La determinación se basa en el igualamiento del color observado en el suelo tanto en seco como en húmedo respecto al color registrado en las tarjetas de color, ubicadas en cada una de las páginas de la Tabla Munsell, donde se manejan los parámetros de matiz (Hue), brillo (Value) e intensidad (Chroma).

Para tal procedimiento, se tomó una pequeña cantidad de cada una de las muestras ya preparadas y con ayuda de una espátula se llenaron los huecos de placas de porcelana.

Se comparó el color de cada muestra en seco con las tablas de Munsell y se registró el valor de matiz, brillo e intensidad. Esto puede observarse en la figura 26.

Una vez ubicado el color del suelo en seco, se humedecieron las muestras sin saturarlas, teniendo cuidado de no exceder el agua. Se comparó el color de cada muestra con las tablas y se registraron los valores.

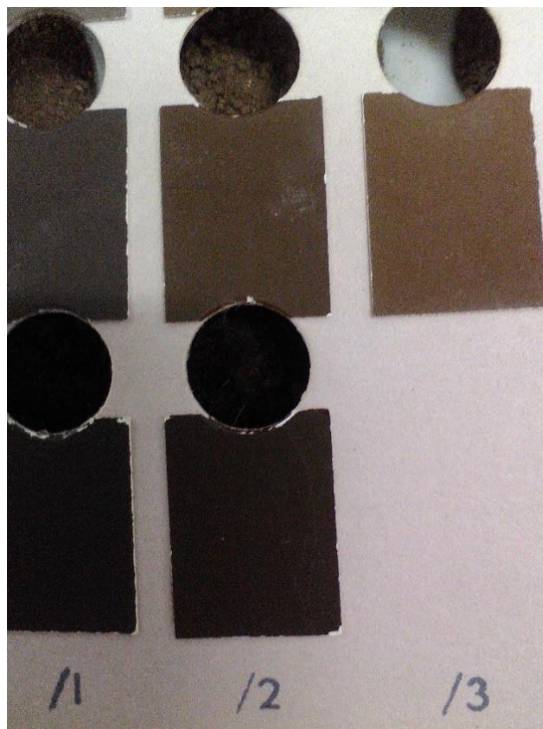


Figura 26. Comparación de color empleando las tablas de Munsell

2.3.4 DENSIDAD DEL SUELO Y POROSIDAD

2.3.4.1 DENSIDAD REAL

Para la determinación de la densidad real se utilizó el método AS-04 de la NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-021-SEMARNAT-2000, el cual se basa en el método del picnómetro.

Para esta determinación fue necesario llevar a cabo un pretratamiento de las muestras como lo marca la norma a través de la destrucción de la materia orgánica con agua oxigenada. Esto se realiza siguiendo el procedimiento del método de la pipeta Lowy. Después de tener las muestras preparadas, se pesó un picnómetro seco para cada muestra. Se colocaron 5 g de suelo, registrando el peso del picnómetro con suelo. Ver figura 27.

Posteriormente se adicionó agua destilada hervida recientemente y fría hasta la mitad del volumen de cada picnómetro y se colocaron todas las muestras debidamente identificadas en el desecador. Se dejaron reposar las muestras por 30 minutos aproximadamente y se llenó cada uno hasta aforo con agua destilada hervida y fría. Se prosiguió a pesar picnómetro con el suelo y el agua y a tomar la temperatura de las muestras.



Figura 27. Lote de muestras para su determinación de densidad real.

2.4.4.2 DENSIDAD APARENTE

La determinación de densidad aparente se realizó por el método de la probeta descrito en la metodología de análisis físico-químicos de suelo por Domínguez y Aguilera (1982).

Se pesaron probetas de 10 mL perfectamente secas y se colocaron las muestras de suelo tamizado.

Se golpeó cada probeta para acomodar las partículas de suelo y para asegurar llenar hasta la marca.

Se pesaron las probetas con el suelo como se aprecia en la figura 28 y se realizaron los cálculos correspondientes.



Figura 28. Determinación de densidad aparente mediante el método de la probeta.

2.4.4.3 POROSIDAD

La porosidad se calculó a partir de los valores de densidades real y aparente según la

fórmula: $\varepsilon_T = 1 - \frac{\rho^b}{\rho_s}$ (Porta, *et al.*, 2003)

Donde:

ε_T : Porosidad

ρ^b : Densidad

2.4.5 TEXTURA

Mediante el método AS-09 de la Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000, se realizó la determinación de textura de las muestras a través del procedimiento de Bouyoucos.

El método requirió la eliminación de la agregación debida a materia orgánica y la floculación debida a los cationes calcio y magnesio. No se eliminan otros cementantes como carbonatos. El tiempo de lectura fue de 40 segundos para la separación de partículas mayores de 0.05 mm (arena) y de 2 horas para partículas de diámetro mayores de 0.002 mm (limo y arena). Estos límites han sido establecidos por el Departamento de Agricultura de Estados Unidos.

Para la eliminación de la materia orgánica se pesaron 120 g de suelo en un vaso de precipitados de 500 mL y se agregó agua oxigenada hasta la saturación. Posteriormente se procedió a evaporar el agua oxigenada de cada muestra de suelo hasta sequedad utilizando una estufa. Se repitieron los pasos agregando más agua oxigenada a cada muestra y evaporarla hasta asegurar la nula reacción con el suelo.

Después de eliminar la materia orgánica y llevar a sequedad el suelo, se pesaron 100 g cada muestra de suelo y se adicionó agua hasta cubrir la superficie con una lámina de 2 cm. Se agregaron 10 mL de hexametáfostato de sodio y se pasaron las muestras a parrillas de agitación para lograr una dispersión.

Al finalizar el tiempo de agitación se vertió el contenido a probetas de 1000 mL y se agregó agua destilada hasta completar un litro, considerando el volumen que ocuparía el hidrómetro dentro de la suspensión.

Se suspendió el suelo con un agitador de mano durante un minuto y se tomaron las lecturas del hidrómetro a los 40 segundos y después de 2 horas, así como el registro de la temperatura.

En la figura 29 puede observarse un lote de muestras mientras transcurre el tiempo para la segunda medición.



Figura 29. Lote de muestras para la determinación de textura.

2.4.6 COEFICIENTE DE EXTENSIBILIDAD LINEAL

Para tal determinación se utilizó el método descrito en el manual de campo de estudios del suelo y métodos de laboratorio; “Soil Survey Investigations Report No. 51 Version 2, 2014” del Departamento de Agricultura de Estados Unidos, por Robert B. Grossman del Servicio de Conservación de Recursos Naturales, Personal del Estudio de Suelos. En este método, el coeficiente de extensibilidad lineal es calculado a partir de la extracción de núcleos y midiendo los cambios en la circunferencia antes y después del secado.

El primer paso fue medir el diámetro de una caja Petri y llenar una de las partes de la caja con el suelo preparado, esto se realizó para las 25 muestras.

Se humectaron las cajas hasta la saturación del suelo con agua desmineralizada a fin de hacer una pasta saturada.

Posteriormente se dejaron secar la muestras en una mesa a temperatura ambiente para después medir la longitud transversal de cada una de las grietas de cada muestra de suelo y sumar los valores. Ver figura 30.

Mediante la ecuación planteada en el manual de USDA se determinó el valor del coeficiente.



Figura 30. A la izquierda se muestra un lote de muestras húmedas y a la derecha se aprecia una de las muestras después del secado.

2.4.7 ESTABILIDAD DE AGREGADOS

La estabilidad de los agregados se determinó por el método del tamizado o método de Yoder modificado, en el cual se determina el porcentaje de agregados de un tamaño determinado que permanecen sobre un tamiz después de sumergirlo varias veces en agua. Este procedimiento está descrito en el manual de campo de estudios del suelo y métodos de laboratorio; “Soil Survey Investigations Report No. 51 Version 2, 2014” del Departamento de Agricultura de Estados Unidos, retomado del Instituto de Calidad del Suelo (1999).

Se colocan 50 g de suelo seco en un tamiz de 0.5 mm y se introdujeron en un recipiente con agua haciendo oscilaciones a lo largo de una distancia vertical de 1.5 cm (30 oscilaciones/min) durante 3 min. Ver figura 31.

Después se vertió el contenido de cada muestra en vasos de precipitados previamente pesados e identificados y se colocaron en la estufa a 105°C hasta que el suelo estuviera seco. Una vez retiradas las muestras de la estufa, se dejaron enfriar en el desecador, se pesaron y se registraron los valores.



Figura 31. Humectación de una muestra para la determinación de estabilidad de agregados.

2.4 DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES QUÍMICAS

La mayoría de las determinaciones químicas se midieron en el extracto de saturación, el cual es obtenido a partir de la pasta saturada. Para ello se tomó como referencia el método AS-16 de la Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000.

En recipientes de plástico con tapadera hermética se pesaron 120 g de suelo preparado de cada muestra y se registró el peso del recipiente de plástico más suelo.

Se agregó agua destilada a las muestras mezclando lo mejor posible con ayuda de una espátula, hasta alcanzar el punto aproximado de saturación.

Posteriormente se cerraron los recipientes con la mezcla suelo-agua, se dejaron reposar durante 24 horas para obtener una pasta uniformemente saturada.

Después se mezclaron las muestras y se dejaron reposar nuevamente para asegurar el punto de saturación y se calculó el porcentaje de saturación (PS) del suelo de acuerdo al contenido de humedad inicial (PW), al peso de suelo seco a la estufa y a la cantidad de agua agregada al preparar la pasta de suelo.

Una vez asegurado el punto de saturación en las pastas, se procedió a obtener el extracto de saturación de cada muestra por filtración con vacío de la pasta saturada de suelo.

Se ajustó un embudo Büchner a un matraz kitazato y mediante una manguera de plástico se conectó el matraz kitazato con una línea de vacío. Se transfirió una porción de la pasta saturada al embudo Büchner y se extrajo la solución mediante la activación de la bomba de vacío como se muestra en la figura 32. Una vez seca la pasta, se repitió el proceso hasta terminar; se midió el volumen del extracto colectado y se almacenaron las 25 muestras debidamente identificadas para la determinación de los parámetros químicos.



Figura 32. Sistema de vacío para la recolección del extracto de saturación.

2.4.1 pH

Para la determinación del pH del extracto de saturación de las muestras obtenidas a partir de la pasta saturada, se usó como referencia el método AS-02 de la Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000, el cual se basa en el método electrométrico.

Se vertieron 5 mL de muestra en vasos de precipitados de 50 mL, se introdujo el electrodo del medidor marca HANNA HI9811-5 y se registró la lectura para cada muestra.

La medición de una de las muestras puede observarse en la figura 33.



Figura 33. Medición de pH por método potenciométrico.

2.4.2 CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA

Se utilizó el método AS-18 de la Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000 para la determinación de la conductividad eléctrica del extracto de saturación de las muestras.

Esta determinación se realizó inmediatamente después de la medición del pH con el mismo medidor marca HANNA HI9811-5, por lo que solo se pulsó el botón del equipo

para seleccionar la medición de conductividad eléctrica, se registró el valor y se enjuagó el electrodo después de cada cambio de muestra.

2.4.3 CARBONATOS Y BICARBONATOS

2.4.3.1 CARBONATOS

La medición de la concentración de carbonatos se realizó por el método AS-20 de la Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000.

Se colocaron 5 mL del extracto de saturación de cada muestra en matraces Erlenmeyer y se agitaron.

Se añadieron 5 gotas de fenolftaleína mientras se continuaba agitando y se observó si la solución se tornaba de color rosado.

La ausencia de color significó la ausencia de carbonatos, como se aprecia en la figura 34. En caso contrario se tituló con ácido sulfúrico (H_2SO_4) 0.05 N hasta la ausencia de color rosa.

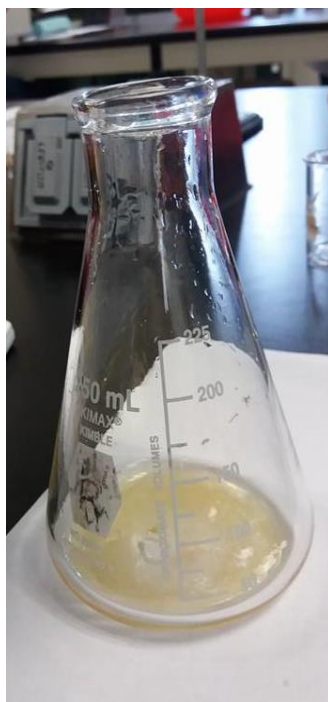


Figura 34. Muestra con fenolftaleína añadida sin vire de color.

2.4.3.2 BICARBONATOS

Utilizando el mismo método para carbonatos, el método AS-20 de la Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000, se determinó la concentración de bicarbonatos.

A las muestras provenientes de la determinación de carbonatos se añadieron 2 gotas de anaranjado de metilo y se agitaron. Se titularon las muestras con ácido sulfúrico (H_2SO_4) 0.05 N hasta llegar a un vire de amarillo a color canela, como se observa en la figura 35. Se realizaron los cálculos marcados en la NOM-021-SEMARNAT-2000.



Figura 35. Determinación de bicarbonatos.

2.4.4 CLORUROS

El método AS-20 de la Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000 también fue utilizado para determinar la concentración de cloruros presentes en el extracto de saturación. Este método se basa en la relación de los cloruros con el nitrato de plata, produciendo un precipitado estable.

Para esta determinación se prepararon 2 blancos, uno para un primer lote de 12 muestras y el otro para un segundo lote de 13 muestras.

Se tomaron alícuotas de 5 mL del extracto de saturación y se vertieron en matraces para su posterior agitación.

Se agregaron 10 gotas de indicador de cromato de potasio (K_2CrO_4) y se continuó agitando.

Se tituló con nitrato de plata ($AgNO_3$) al vire de amarillo a rojo vinoso. El cambio de color se muestra en la figura 36.

Se registró el volumen utilizado por el blanco de cada lote y el de las muestras, para realizar los cálculos que se especifican en la NOM-021-SEMARNAT-2000.



Figura 36. Vire de color para la determinación de cloruros.

2.4.5 CALCIO

Para la determinación de calcio se utilizó el procedimiento señalado en el Manual del Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA), llamado Titulación EDTA (6N4b).

Se prepararon dos blancos para las muestras que se separaron en lotes.

En matraces Erlenmeyer se colocaron alícuotas de los extractos de saturación y se agitaron para agregar posteriormente 5 gotas de carbamato.

Se agregó a cada muestra una gota de hidróxido de sodio (NaOH) y una mínima cantidad de murexida y se continuó mezclando.

Se tituló con EDTA, observando un cambio de rosa a color lavanda (figura 37), se registraron los resultados y se aplicó la ecuación marcada en el manual del USDA.

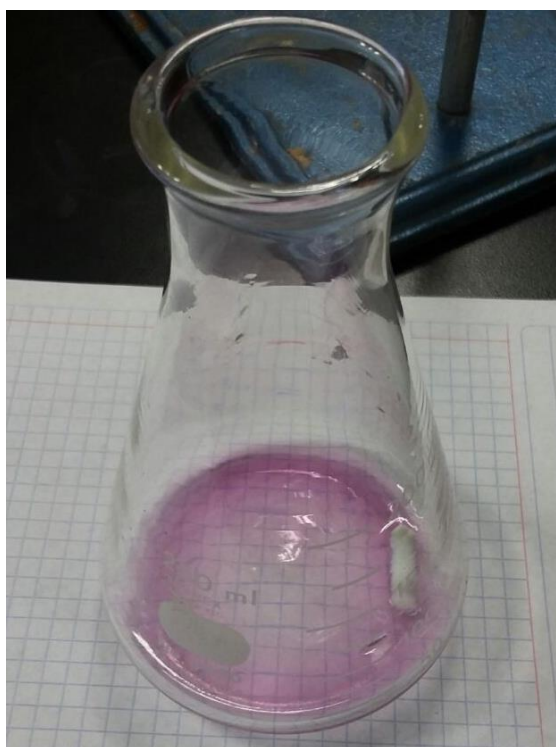


Figura 37. Vire de color en la determinación de calcio.

2.4.6 MAGNESIO

Se procedió de acuerdo al Manual del Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA), mediante el método llamado Titulación EDTA (6O4b).

A la muestras que se titularon para la determinación de calcio, se agregaron 3 gotas de ácido clorhídrico concentrado (HCl), y se agitaron hasta la destrucción del murexida.

Se agregaron 3 mL de solución buffer de cloruro de amonio-hidróxido de amonio (NH_4Cl NH_4OH). Posteriormente se añadió 1 gota de indicador negro de Eriocromo T.

Se procedió con una titulación usando EDTA al punto final de color azul, como en la figura 38. Se realizaron los cálculos correspondientes de acuerdo a la ecuación establecida en el manual.

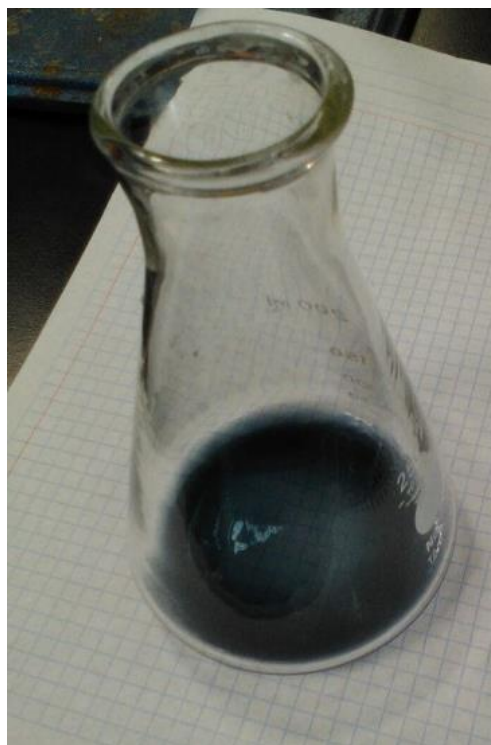


Figura 38. Vire de color para la determinación de magnesio.

2.4.7 NITRÓGENO

La determinación de nitrógeno total se realizó con base en el método AS-25 de la Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000. Este método se basa en el procedimiento micro-Kjeldahl, mediante la extracción del amonio intercambiable por equilibrio de la muestra de suelo con ácido sulfúrico (H_2SO_4) y su determinación por destilación mediante arrastre de vapor en presencia de ácido bórico (H_3BO_3).

Para esta determinación se prepararon 2 blancos.

Se colocaron 5 g de suelo tamizado de cada muestra en tubos de destilación microkjeldahl.

Posteriormente se agregaron 1.1 gramos de mezcla de catalizadores y 6 mL de H_2SO_4 concentrado y se agitaron las muestras. Se calentaron en una unidad digestora a temperatura de $270^{\circ}C$ por 12 horas, como se muestra en la figura 39.



Figura 39. Sistema digestor.

Transcurrido el tiempo de digestión se añadieron al tubo 15 mL de agua destilada y se colocó un tubo a la vez en el destilador microkjeldahl; se añadieron 15 mL de hidróxido de sodio (NaOH) al 10 N.

Se procedió a la destilación usando un matraz Erlenmeyer con 50 mL de H_3BO_4 como indicador.

Finalmente se tituló con ácido sulfúrico (H_2SO_4) al 0.01 N al punto final de la titulación de color rosa fuerte. Se registraron los resultados y se aplicó la fórmula correspondiente señalada en la NOM-021-SEMARNAT-2000.

2.4.8 CARBONO ORGÁNICO Y MATERIA ORGÁNICA

La determinación de materia orgánica se evaluó a través del contenido de carbono orgánico mediante el método AS-07 de la Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000. Esta determinación se basa en el método de Walkley y Black, dándose la oxidación del carbono orgánico del suelo por medio de una disolución de dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$).

Se prepararon dos blancos, una para cada lote de muestras.

Se pesaron 0.1 g de suelo seco preparado de cada muestra. Se adicionaron 10 mL de dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$) 1 N. Se agregaron 10 mL de ácido sulfúrico (H_2SO_4) concentrado y se agitaron y calentaron las muestras a 60 °C durante 10 minutos. Se dejaron reposar durante 30 minutos y se les añadió ácido fosfórico (H_3PO_4) concentrado, posteriormente se agregó el indicador difenilamina para la titulación con sulfato ferroso hasta un punto final verde. La titulación puede verse en la figura 40.

Se aplicaron las fórmulas señaladas en la NOM-021-SEMARNAT-2000 para obtener el porcentaje de carbono orgánico y la conversión a materia orgánica.



Figura 40. Titulación para la determinación de materia orgánica.

2.4.9 ACIDEZ EXTRAÍBLE

Para la determinación de acidez extraíble se empleó el método AS-32 de la Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000. Esta acidez liberada del suelo se da a partir de la adicción de una solución de BaCl_2 – TEA a pH 8.2.

Se emplearon dos blancos para las determinaciones, un blanco por lote de muestras.

Se pesaron 25 g de suelo preparado de cada muestra y se colocaron en el embudo con papel filtro para la posterior infiltración de 50 mL de solución BaCl_2 -TEA, como se observa en la figura 41.

Se colectó este extracto y se agregaron 2 gotas de indicador rojo de metilo. Se procedió a la titulación con HCl 1 N, hasta el vire de color de amarillo a rojo.

Las muestras de suelo en el embudo se conservaron para continuar con la determinación de CIC.

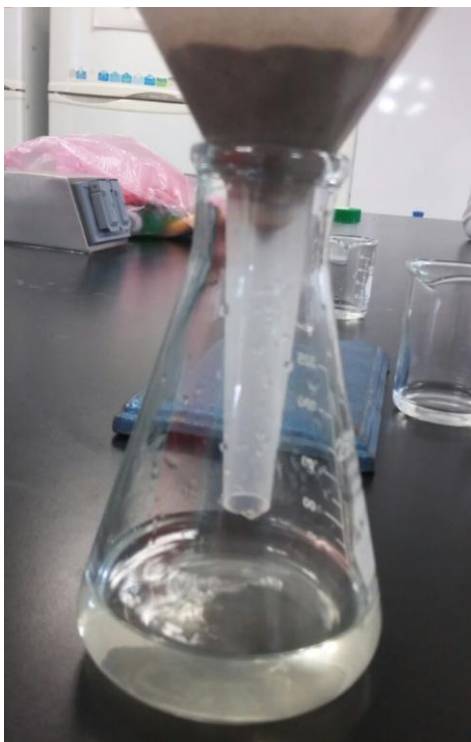


Figura 41. Infiltración de la solución BaCl_2 -TEA para la determinación de acidez extraíble.

2.4.10 CAPACIDAD DE INTERCAMBIO CATIÓNICO

Para esta valoración se tomaron las muestras de suelo obtenidos de las determinaciones de acidez extraíble y se les hizo pasar agua desionizada.

Después se infiltraron 100 mL de acetato de sodio 0.1 M y se agregaron 20 mL de solución buffer a cada extracto obtenido.

Se les agregó el indicador negro de Eriocromo T y se titularon con EDTA hasta el vire de color rojo violeta a azul. El color final de la titulación se muestra en la figura 42.

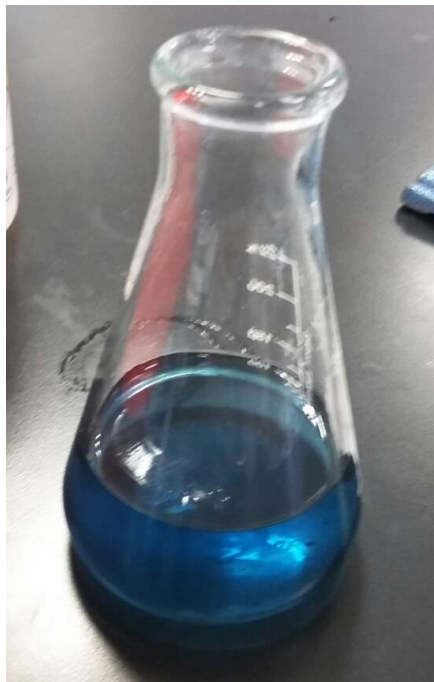


Figura 42. Vire de color para la determinación de CIC.

2.5 DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES HIDROLÓGICAS

La determinación de estas propiedades se realizó mediante el empleo del software de simulación “Soil Water Characteristics”, cuyo fundamento se basa en las ecuaciones que desarrollaron Saxton y Rawls (2006), este software se encuentra en la página del Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA): <https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detailfull/national/water/?cid=stelprdb1045311>.

Las variables que se introdujeron en el software fueron:

- % Arena.
- % Arcilla.
- % Materia orgánica.
- Valor de salinidad [dS/m].
- % Grava.
- Grado de compactación.
- Humedad al momento de muestreo.

El programa arrojó como datos de salida:

- El porcentaje de punto de marchitamiento permanente.
- La capacidad de campo.
- Saturación.
- Agua disponible.
- Conductividad hidráulica.
- Densidad aparente.
- Curvas de potencial matricial.
- Curvas de potencial matricial + osmótico.
- Curvas de conductividad hidráulica.

La interfaz del programa se muestra en la figura 43.

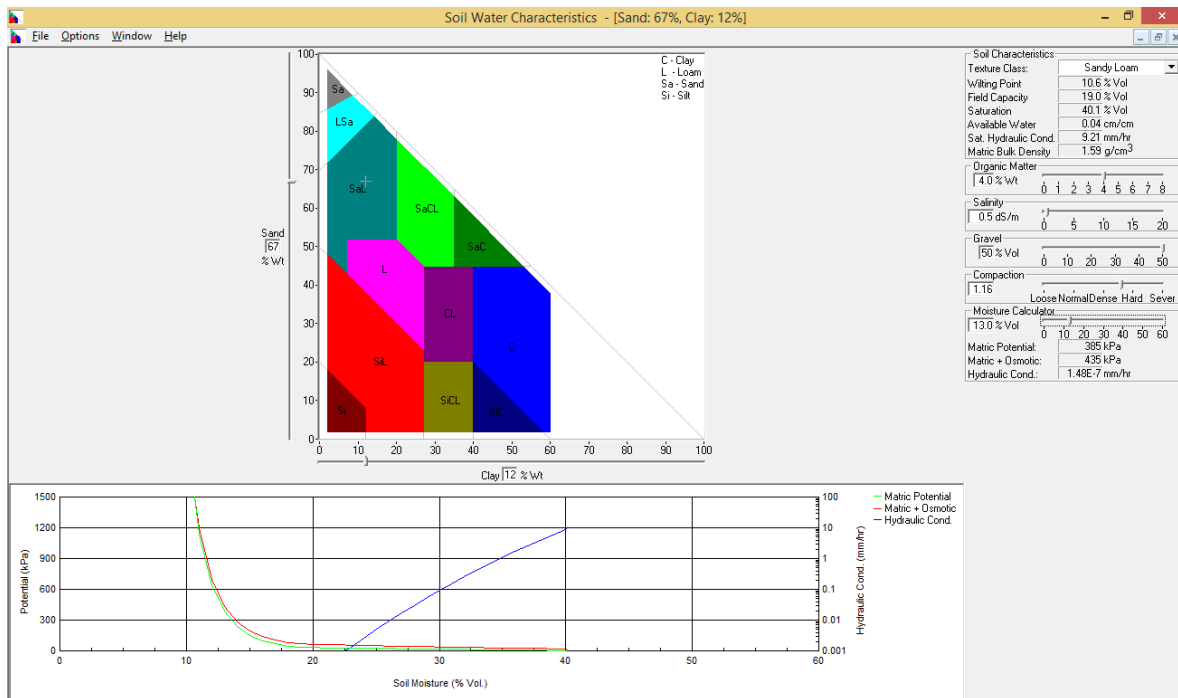


Figura 43. Interfaz del software "Soil Water Characteristics".

2.5 PERSPECTIVA SOCIAL

Para la valoración del aspecto social fue necesaria la aplicación de encuestas a vecinos de la zona de estudio que realizan actividades ahí.

Se consideraron 12 preguntas a 50 personas para conocer qué actividades realizan los encuestados, la frecuencia de éstas, las demás actividades que se observan, las actividades de reforestación y/o cuidado que se llevan a cabo y la perspectiva que tienen acerca del cerro de Amalucan, así como las medidas que propondrían para la mejora del sitio en cuanto a recursos naturales se refiere. El formato de la encuesta se presenta en la figura 44. Cabe mencionar que no se aplicó una fórmula para estimar el número de encuestas necesarias debido a que no se sabe el número específico de personas que visitan la zona.

Las encuestas se realizaron el 29 de septiembre de 2017 por la mañana.



Sexo: _____ Edad: _____ Fecha: _____



1. ¿Vive en una colonia aledaña al cerro de Amaluacán?
 Sí No
2. ¿Sabía que el cerro de Amaluacán está considerado como una reserva ecológica?
 Sí No
3. ¿Realiza actividades en el cerro?
 Sí No
4. ¿Qué actividades realiza?
 Ejercicio Esparcimiento Labor social Vía alterna de transporte
*Bicicleta *Relajación *Reforestación
*Caminar *Paseo de mascotas *Retiro de basura
*Correr *Día de campo *Cuidado de árboles Otra
*Estiramientos Especifique:
5. ¿Con qué frecuencia realiza estas actividades?
 Diario 2 a 3 veces Fines de semana Una vez al mes
por semana
6. ¿En qué horario realiza las actividades?
 Antes de las 10 h Entre las 10 y 14 h Después de las 14 h
7. ¿Qué actividades usted observa que se realizan en la zona?
 Ejercicio Esparcimiento Labor social Vía alterna de transporte
*Bicicleta *Relajación *Reforestación
*Caminar *Paseo de mascotas *Retiro de basura
*Correr *Día de campo *Cuidado de árboles Otra
*Estiramientos Especifique:
 Pastoreo Tala de árboles Quema de pastizal
8. ¿Ha observado que se realizan actividades de conservación y/o mejora?
 Sí No
9. ¿Quiénes se encargan de hacerlas?
 Estudiantes Gobierno Vecinos de la zona
 Organizaciones civiles/sociales Otra: _____
10. ¿Qué mejoras ha observado?
 Reforestación Limpieza Zanjas (barreras para controlar deslaves)
 Vigilancia Ninguna Otra: _____
11. ¿Cuál es su percepción respecto al cerro?
12. ¿Qué acciones propondría para mejorar las condiciones del cerro desde el punto de vista de sus recursos naturales?

Figura 44. Formato de la encuesta aplicada a las personas que realizan actividades en el cerro.

CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 CONDICIONES DE SUPERFICIE

Tabla 7. *Condiciones de superficie del cerro de Amalucan.*

POSICIÓN FISIOGRÁFICA	PENDIENTE DEL TERRENO	EROSIÓN Y DEPÓSITO	ESCURRIMIENTO
Tierra alta.	Tipo D o de lomerío.	Erosión hídrica	Medio a excesivo

El cerro de Amalucan se clasifica como tierra alta, comprobando que el suelo deriva de la descomposición o desintegración de la roca madre subyacente.

Como se mencionó anteriormente, según la carta topográfica, la pendiente del cerro varía de 16 a 23%, por lo que coincide con una clasificación tipo D, ya que esta abarca pendientes de 16 a 30%.

Debido a que todos los suelos con pendiente y poca vegetación se erosionan y en mayor medida si la pendiente es más grande, el cerro presenta signos alarmantes de erosión hídrica, observándose en los diferentes niveles de altura, ya que en las zonas altas se observa pedregosidad superficial y por ende escasa profundidad de horizontes del suelo; es decir, presencia de material rocoso a pocos centímetros.

De acuerdo a la superficie del cerro, se determina que la forma de erosión hídrica es por arrastre de suelo en superficie de tipo laminar, donde el agua desciende uniformemente por la pendiente, removiéndose así, capas delgadas de suelo

En lo que respecta al escurrimiento, es sabido que la mayoría de los suelos de pendiente ligera sin una buena cubierta de vegetación, generalmente tienen un escurrimiento excesivo o rápido (R. Earl, 1970); aunque el cerro está cubierto por árboles de eucalipto principalmente, éstos no dan buenos resultados para controlar la erosión en condiciones de sequía, ya que pueden terminar con la vegetación rasante absorbiendo el agua con sus raíces.

3.2 DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES FÍSICAS

3.2.1 PROFUNDIDAD DEL SUELO

Las profundidades de muestreo se pueden observar en la tabla 8. Aunque la profundidad estándar fue de 25 cm, en algunos puntos no fue posible realizar la excavación hasta tal longitud debido a la alta presencia de elementos rocosos, principalmente en la zona alta del cerro.

Tabla 8. Profundidad de muestreo en los 25 puntos.

PUNTO DE MUESTREO	PROFUNDIDAD (cm)	PUNTO DE MUESTREO	PROFUNDIDAD (cm)
M1	20	M14	25
M2	25	M15	25
M3	25	M16	20
M4	15	M17	25
M5	25	M18	25
M6	25	M19	15
M7	20	M20	24
M8	25	M21	25
M9	25	M22	20
M10	25	M23	23
M11	25	M24	25
M12	15	M25	20
M13	25		

En la mayoría de puntos se observaron dos horizontes de suelo, A y B, más el horizonte de materia orgánica, bajo las excepciones de los puntos M4, M12 y M19, donde no se observaron bien delimitados los horizontes, además de la elevada presencia de material rocoso. En la figura 45 se observa la medición del perfil en el punto M13.



Figura 45. Perfil del suelo de donde se obtuvo la muestra M13.

3.2.2 ELEMENTOS GRUESOS

El porcentaje de elementos gruesos presentes en el suelo se muestra en la tabla 9.

Tabla 9. Porcentaje de elementos gruesos presentes en cada punto de muestreo.

PUNTO DE MUESTREO	% ELEMENTOS GRUESOS	PUNTO DE MUESTREO	% ELEMENTOS GRUESOS
M1	30	M14	15
M2	15	M15	10
M3	15	M16	40
M4	75	M17	20
M5	15	M18	10
M6	20	M19	75
M7	40	M20	30
M8	10	M21	25
M9	10	M22	30
M10	40	M23	20
M11	15	M24	10
M12	75	M25	50
M13	30		

Por lo que puede observarse, la presencia del material rocoso es relativamente alta en el cerro de Amalucan, principalmente en las zonas altas, recordando que estas zonas están representadas por los puntos M1, M4, M7, M10, M13, M16, M19, M22 y M25, además del punto M12 que se encuentra en la parte baja.

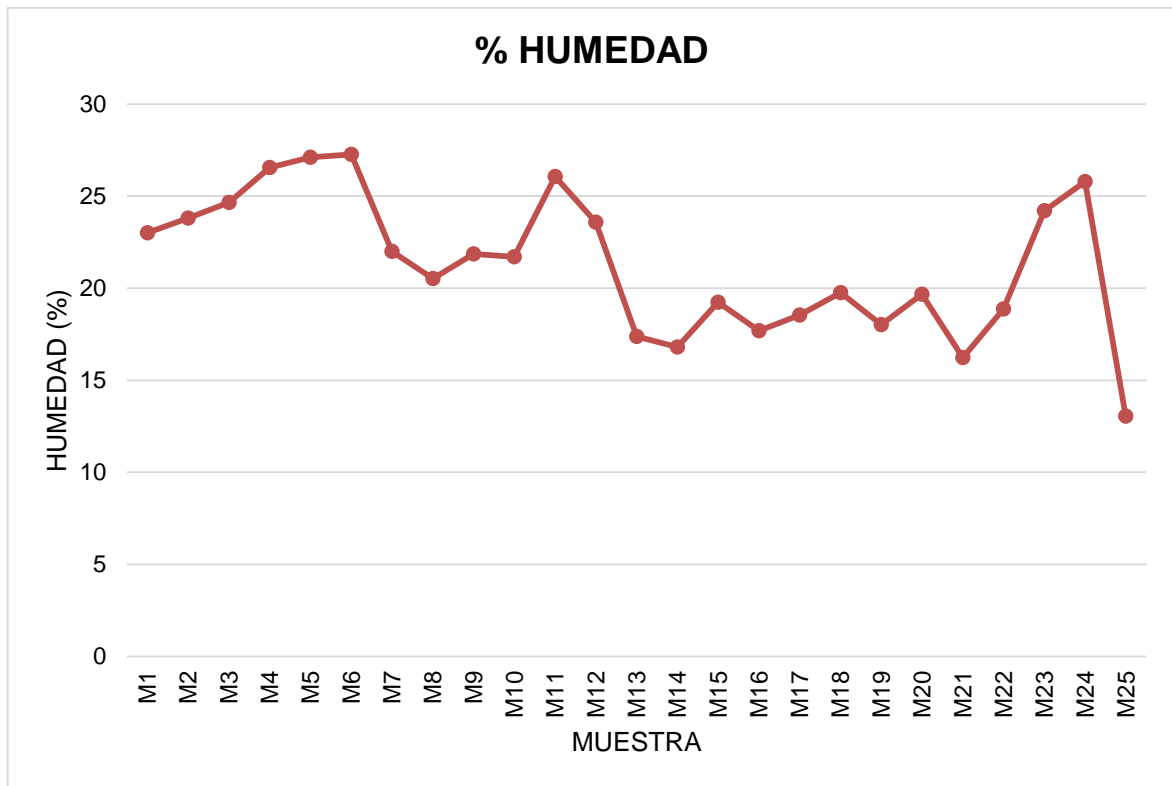
Estos resultados coinciden con la clasificación en cuanto a la fase física señalada en la carta edafológica, elaborada por la Coordinación General de los Servicios Nacionales de Estadística, Geografía e Informática (1982), donde la zona está catalogada como pedregosa.

3.3.3 CONTENIDO DE HUMEDAD

En la tabla 10 se presentan los porcentajes de humedad de las muestras.

Tabla 10. Porcentajes de humedad de las muestras en el cerro de Amalucan.

MUESTRA	% HUMEDAD	MUESTRA	% HUMEDAD
M1	23.01	M14	16.80
M2	23.80	M15	19.24
M3	24.66	M16	17.68
M4	26.55	M17	18.53
M5	27.11	M18	19.76
M6	27.26	M19	18.02
M7	22.00	M20	19.67
M8	20.52	M21	16.22
M9	21.85	M22	18.86
M10	21.70	M23	24.20
M11	26.06	M24	25.79
M12	23.58	M25	13.04
M13	17.37		



Gráfica 1. Porcentaje de humedad del suelo en el cerro de Amalucan.

Como puede observarse en la gráfica 1, el porcentaje de humedad en los diferentes puntos del cerro, oscila entre 13 y 27 %, con un promedio de 21.33%.

El valor más crítico se presentó en el punto M25, que es el punto más alto del cerro. Se observa que algunos puntos siguen un comportamiento de humedad más alta conforme disminuye al altura, esto es lógico debido a que el agua desciende y se acumula en las zonas bajas; se observa este comportamiento en las líneas: M1, M2 y M3; M4, M5 y M6; M16, M17 y M18; M22, M23 y M24. En los casos donde el comportamiento no obedece esta relación se puede asumir que la presencia de vegetación influya al contener mayor cantidad de agua en ciertos puntos.

3.3.4 COLOR

La siguiente tabla muestra los resultados de color seco y húmedo de las diferentes muestras.

Tabla 11. Resultados de color de las muestras en el cerro de Amalucan.

MUESTRA	COLOR SECO		COLOR HÚMEDO	
M1	10YR 4/2	Marrón grisáceo oscuro	10YR 2/2	Café muy oscuro
M2	10 YR 3/3	Café oscuro	10YR 2/2	Café muy oscuro
M3	10 YR 4/2	Marrón grisáceo oscuro	5YR 2.5/1	Marrón rojizo oscuro
M4	7.5YR 4/4	Rojo	5YR 3/2	Marrón rojizo oscuro
M5	5YR 3/1	Gris muy oscuro	5YR 2.5/1	Marrón rojizo oscuro
M6	10YR 3/2	Grisáceo muy oscuro marrón	10YR 2/1	Negro
M7	10YR 3/2	Grisáceo muy oscuro marrón	10YR 2/2	Café muy oscuro
M8	5YR 3/2	Marrón rojizo oscuro	5YR 2.5/1	Marrón rojizo oscuro
M9	10YR 4/2	Marrón grisáceo oscuro	5YR 3/1	Gris muy oscuro
M10	10YR 3/2	Grisáceo muy oscuro marrón	5YR 2/1	Negro parduzco
M11	10YR 3/2	Grisáceo muy oscuro marrón	10YR 2/1	Negro
M12	10YR 3/1	Gris muy oscuro	10YR 2/1	Negro
M13	10YR 3/2	Grisáceo muy oscuro marrón	5YR 2.5/1	Marrón rojizo oscuro
M14	7.5YR 4/2	Café	7.5YR 3/2	Café oscuro
M15	10YR 3/3	Café oscuro	10YR 2/1	Negro
M16	7.5YR 4/2	Café	5YR 2.5/1	Marrón rojizo oscuro
M17	10YR 3/2	Grisáceo muy	10YR 2/1	Negro

MUESTRA	COLOR SECO		COLOR HÚMEDO	
		oscuro marrón		
M18	10YR 3/2	Grisáceo muy oscuro marrón	5YR 2.5/1	Marrón rojizo oscuro
M19	5YR 4/3	Marrón rojizo	5YR 2.5/2	Marrón rojizo oscuro
M20	5YR 3/2	Marrón rojizo oscuro	5YR 2.5/1	Marrón rojizo oscuro
M21	7.5YR 4/2	Marrón grisáceo oscuro	5YR 2.5/1	Marrón rojizo oscuro
M22	7.5YR 3/2	Café oscuro	5YR 2.5/2	Negro
M23	10YR 3/4	Café	7.5YR 2/1	Negro
M24	10YR 4/2	Marrón oscuro grisáceo	10YR 3/1	Negro parduzco
M25	10YR 3/2	Grisáceo muy oscuro marrón	10YR 2/1	Negro

Tabla 11 Continuación. Resultados de color de las muestras en el cerro de Amalucan.

Como puede observarse en la tabla 11, el color de las muestras de suelo varía en tonos marrones, rojizos y negros.

El color rojo predomina en zonas altas, mientras que en las partes medias y bajas predominan suelos pardos, marrones y grises.

A pesar de que los colores oscuros en suelos se asocian a la presencia de materia orgánica, también los colores pardos coinciden con la edad del suelo, ya que éstos se asocian con estados iniciales o intermedios de meteorización, además de presentar niveles bajos a medios de materia orgánica y de fertilidad. Según información de la FAO, los colores cálidos, pardos y rojos presentan buen drenaje.

Gracias a esta información y a lo observado en el muestreo, se puede inferir que el color que presentan la mayoría de las muestras se debe al estado de meteorización.

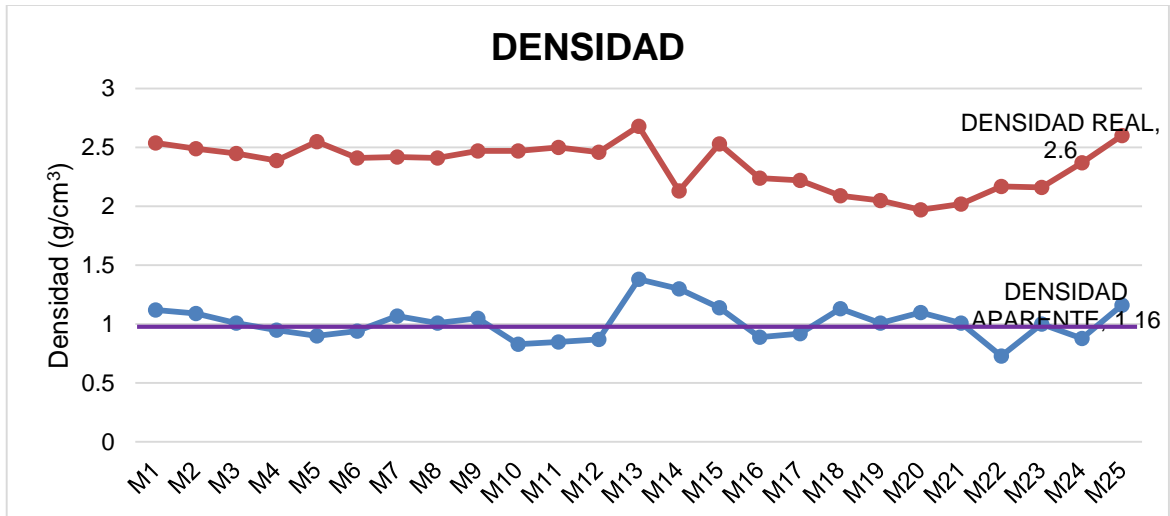
3.3.4 DENSIDAD DEL SUELO Y POROSIDAD

En la tabla 12 se presentan los resultados de densidad y porosidad.

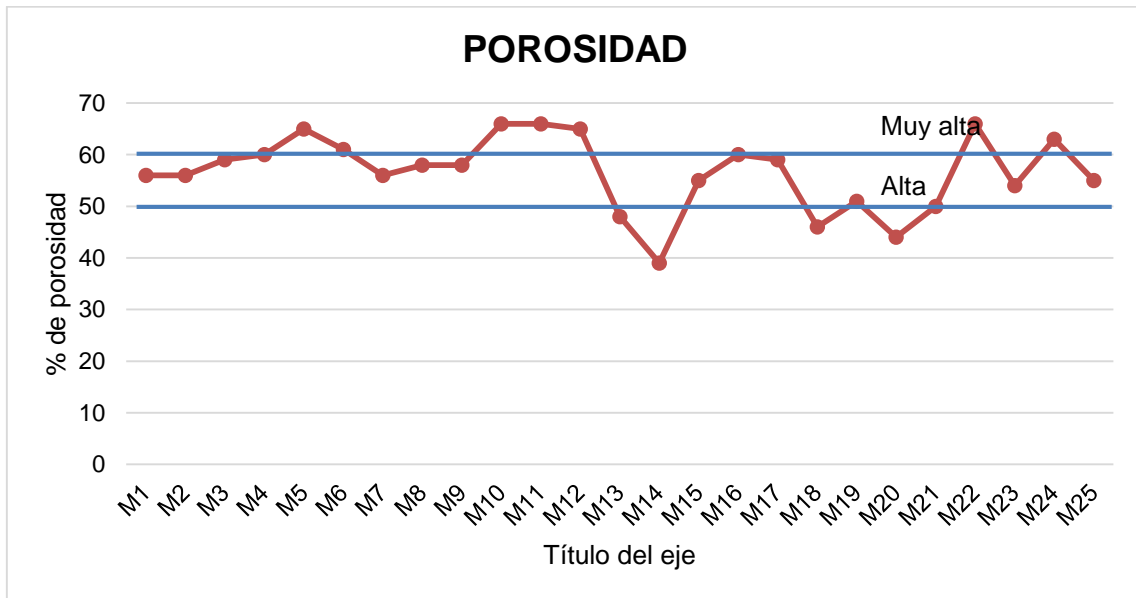
Tabla 12. *Densidad real, aparente y porosidad de las muestras del cerro de Amalucan.*

MUESTRA	DENSIDAD APARENTE (g/cm ³)	DENSIDAD REAL (g/cm ³)	% POROSIDAD
M1	1.12	2.54	56
M2	1.09	2.49	56
M3	1.01	2.45	59
M4	0.95	2.39	60
M5	0.90	2.55	65
M6	0.94	2.41	61
M7	1.07	2.42	56
M8	1.01	2.41	58
M9	1.05	2.47	58
M10	0.83	2.47	66
M11	0.85	2.50	66
M12	0.87	2.46	65
M13	1.38	2.68	48
M14	1.30	2.13	39
M15	1.14	2.53	55
M16	0.89	2.24	60
M17	0.92	2.22	59
M18	1.13	2.09	46
M19	1.01	2.05	51
M20	1.10	1.97	44
M21	1.01	2.02	50
M22	0.73	2.17	66
M23	1.00	2.16	54
M24	0.88	2.37	63
M25	1.16	2.60	55

En las gráficas 2 y 3 pueden apreciarse estos resultados con sus respectivos límites.



Gráfica 2. Densidad de las muestras del cerro de Amalucan.



Gráfica 3. Porosidad de las muestras de suelo del cerro de Amalucan.

De acuerdo a lo establecido en la NOM-021-SEMARNAT-2000 (véase figura 46) y a la clasificación del tipo de suelo de acuerdo al INEGI, los resultados de densidad deberían estar por debajo de 1 g/cm³ (indicada con la línea morada), ya que es un suelo volcánico, sin embargo solo 10 muestras se encuentran debajo de este valor, 8 muestras están por apenas encima de 1 g/cm³ y las 7 restantes se encuentran fuera del rango en mayor

proporción. M13, M14 y M15 que presentan mayor densidad, son puntos con mayor ocurrencia de personas.

INTERPRETACION DE RESULTADOS

Tipos de suelos	g/cm ³	
Orgánicos y volcánicos	Menor de 1.00	
Minerales		
Arcillosos	1.0	1.19
Francosos	1.20	1.32
Arenosos	Mayor a 1.32	

Figura 46. Interpretación de resultados de densidad según la NOM-021-SEMARNAT-2000

De acuerdo a la gráfica 3, 5 de las muestras presentan porosidad media (M13, M14, M18, M20 y M21), 4 presentan porosidad medianamente amplia (M15, M19, M23 y M25) mientras que el resto presenta porosidad alta y muy alta, comparando con la figura 47.

En general, estos valores demuestran que el suelo tiene una buena porosidad y por lo tanto una buena aireación y penetración de raíces. Aquellos puntos que sobrepasan el 60% de poros podrían presentar problemas de drenaje, sin embargo, tampoco se puede establecer un vínculo directo debido a que la permeabilidad del suelo se relaciona con la forma y distribución del tamaño de poros, más no con el contenido total de ellos.

Cabe mencionar que no se puede establecer una relación entre la pedregosidad y la porosidad en este caso, debido a que la densidad aparente que se está considerando no contempla ramas, pedregosidad ni agua.

Porosidad total (%)	Interpretación
< 30	Muy baja
30 - 40	Baja
40 - 50	Media
50 - 60	Alta
> 60	Muy alta

Figura 47. Clasificación del espacio poroso (Flores Delgadillo & Alcalá Martínez, 2010)

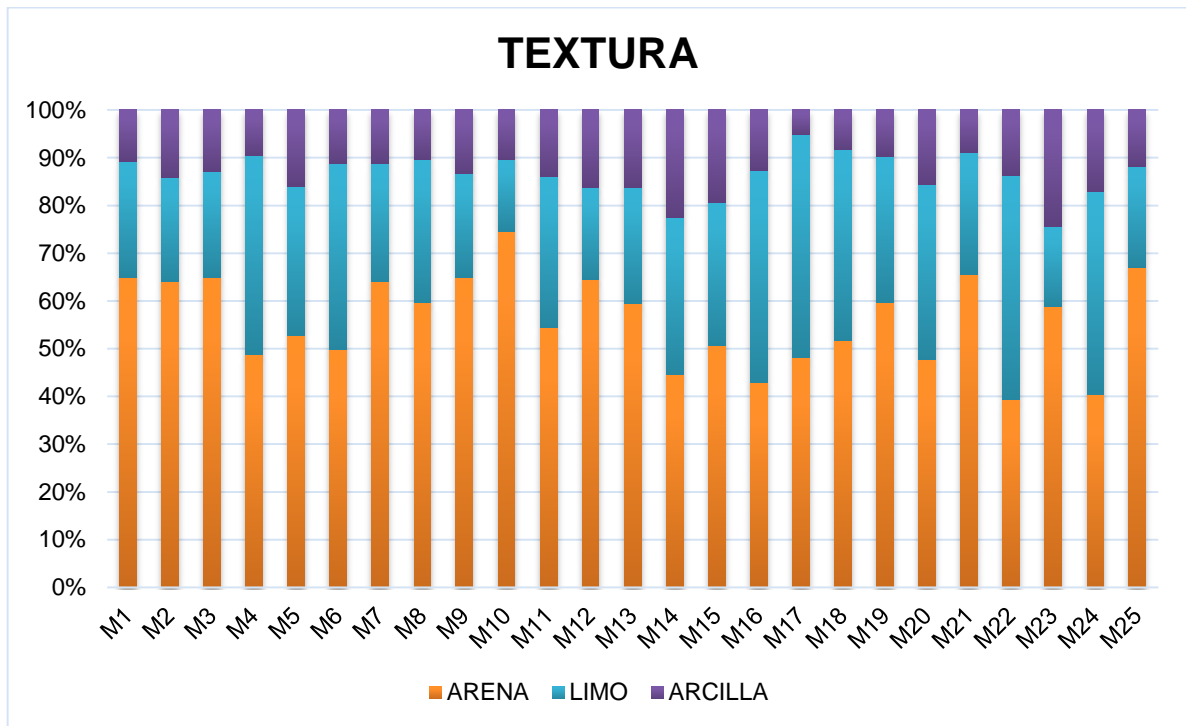
3.3.5 TEXTURA

Los porcentajes de arena, limo y arcilla y la clase textural se presentan en la tabla 13.

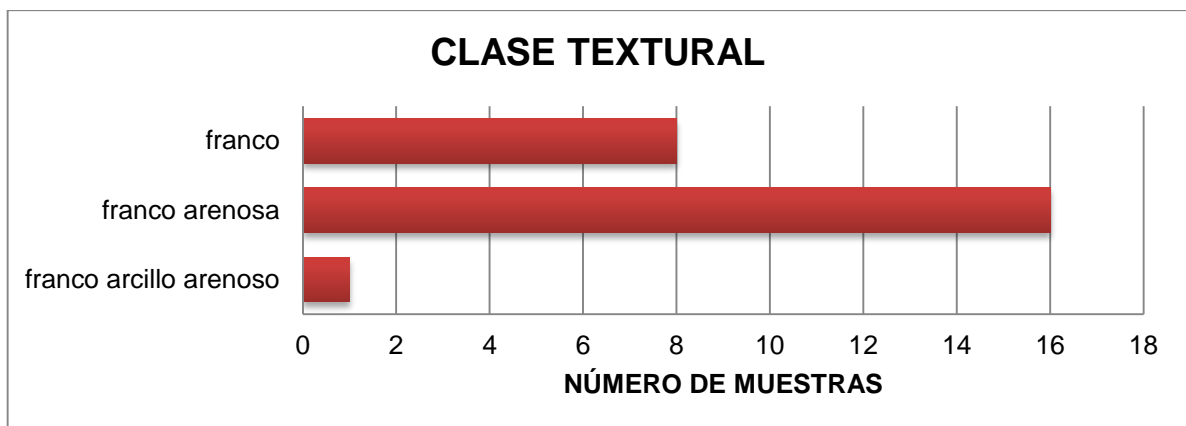
Tabla 13. *Textura de las muestras del cerro de Amalucan.*

MUESTRA	% ARENA	%LIMO	%ARCILLA	CLASE TEXTURAL
M1	65.0	24.3	10.74	Franco arenoso
M2	64.0	21.9	14.10	Franco arenoso
M3	65.0	22.1	12.92	Franco arenoso
M4	48.8	41.8	9.42	Franco
M5	52.8	31.1	16.10	Franco arenoso
M6	49.8	39.1	11.10	Franco
M7	64.0	24.9	11.10	Franco arenoso
M8	59.6	30.1	10.28	Franco arenoso
M9	65.0	21.6	13.42	Franco arenoso
M10	74.6	15.0	10.36	Franco arenoso
M11	54.5	31.6	13.90	Franco arenoso
M12	64.5	19.3	16.26	Franco arenoso
M13	59.5	24.3	16.26	Franco arenoso
M14	44.5	32.9	22.56	Franco
M15	50.7	29.9	19.36	Franco
M16	42.9	44.4	12.72	Franco
M17	48.2	46.7	5.08	Franco arenoso
M18	51.6	40.0	8.36	Franco arenoso
M19	59.64	30.72	9.64	Franco arenoso
M20	47.64	36.72	15.64	Franco
M21	65.64	25.44	8.92	Franco arenoso
M22	39.28	47.08	13.64	Franco
M23	68.2	19.3	28.36	Franco arcillo arenoso
M24	40.4	42.6	17.08	Franco
M25	67.0	21.1	11.92	Franco arenoso

De manera gráfica se puede observar el porcentaje de estos componentes, así como el número de muestras que presenta una clase textural específica. Véase gráfica 4 y 5.



Gráfica 4. Distribución de arena, limo y arcilla en cada muestra del cerro de Amalucan.



Gráfica 5. Cantidad de muestras que presentaron una clase textural específica.

Los resultados de textura demuestran que el suelo del cerro de Amalucan presenta contenidos importantes de arena, 8 muestras tienen una clase textural franca, una

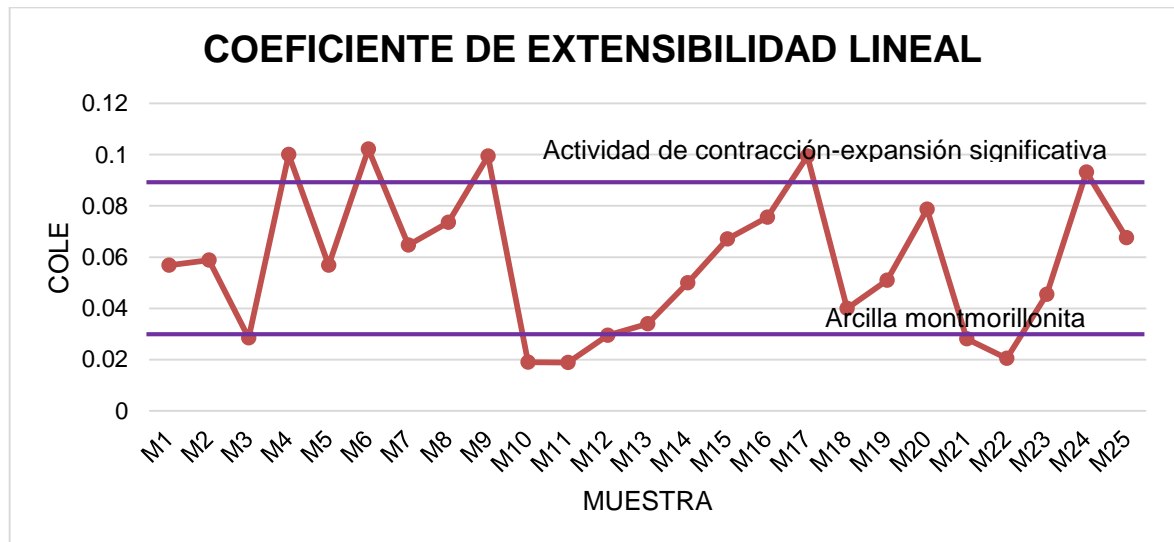
muestra se clasifica como franco arcillo arenosa, mientras que las 16 restantes se clasifican como franco arenosas. En general, se presenta una clase textural media a gruesa, que difiere en cierta forma con la clasificación de cambisol vértico, que debe presentar porcentajes de arcilla más elevados.

3.3.6 COEFICIENTE DE EXTENSIBILIDAD LINEAL

Los resultados del coeficiente de extensibilidad lineal se presentan en la gráfica 6, donde pueden observarse también los límites considerados por el National Soil Survey Laboratory del USDA. Estos límites están relacionados con la presencia de minerales de arcillas. Algunos usos y deducciones que se obtienen de COLE son:

Si el COLE excede de 0.09 se puede esperar una actividad de contracción-expansión significativa.

Si el COLE excede de 0.03 está presente una cantidad significativa de arcilla montmorillonita.



Gráfica 6. Coeficiente de Extensibilidad Lineal de las muestras del cerro de Amalucan.

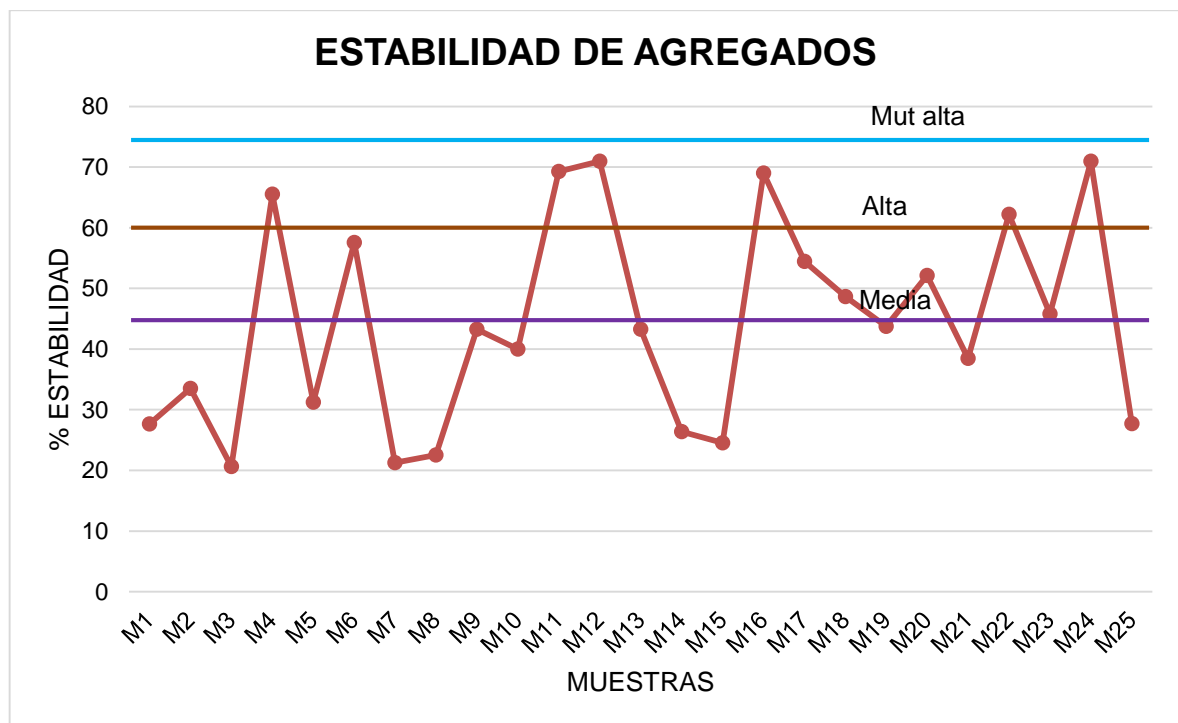
De acuerdo a la gráfica 6, la mayoría de muestras presentan una cantidad importante de esmectitas (montmorillonitas), por lo que la hidratación y el hinchamiento son característicos del suelo del cerro.

5 muestras (M4, M6, M9, M17 y M24) presentan una actividad de contracción-expansión significativa, representando mayores posibilidades de agrietamiento. Estos límites pueden apreciarse en el gráfico mediante las líneas moradas.

3.3.7 ESTABILIDAD DE AGREGADOS

Los resultados de estabilidad de agregados se presentan en la gráfica 7, así como los niveles de estabilidad en la tabla 15.

Los valores utilizados para la comparación son los de la columna de agregados estables al agua con diámetro mayor a 0.5 mm de la figura 48, debido a la metodología que se siguió.



Gráfica 7. Estabilidad de agregados de las muestras del cerro de Amalucan.

Nivel	¹ Agregados estables al agua con diámetro >1 mm	² Agregados estables al agua con diámetro >0,5 mm
Muy alta	>60	>75
Alta	40-60	60-75
Media	20-40	45-60
Baja	10-20	30-45
Muy baja	<10	<30

¹ Diámetro considerado para evaluar la capacidad de infiltración de agua en el suelo

² Diámetro considerado para evaluar la susceptibilidad del suelo a la erosión. Fuente: Florentino, 1998.

Figura 48. Estabilidad de agregados, método tamizado de Yoder modificado (Lobo L. & Pulido M., 2006).

Comparando estos resultados, es posible determinar que la estabilidad en el suelo del cerro no es ideal, debido a que 14 de las muestras presentan una estabilidad baja (el límite se indica con la línea morada), indicando susceptibilidad a la erosión hídrica, 5 muestras presentan una estabilidad media (el valor se indica con la línea marrón) y 6 muestras una estabilidad alta (se indica con la línea azul).

Otros autores consideran que para que un suelo no tenga problemas de estructura, es necesario que tenga estabilidades superiores al 80% (Calderón Sáenz, 2001).

De las muestras con altos valores de estabilidad, 6 coinciden con la textura franca: M4, M6, M16, M20, M22 y M24. Sin considerar la alta pedregosidad presente en algunas muestras, cabe mencionar que a mayor porcentaje de arena existe menor estabilidad, es por esto que en la fórmula para el cálculo de estabilidad se incluye la corrección por la presencia de arena, los resultados arrojaron una mejor estabilidad en estas muestras por los valores más bajos de porcentaje de arena.

3.2.8 RESUMEN DE PROPIEDADES FÍSICAS

Tabla 14. Resumen de propiedades físicas del cerro de Amaluca.

MUESTRA	% ELEMENTOS GRUESOS	% HUMEDAD	% POROSIDAD	CLASE TEXTURAL	COLE	%ESTABILIDAD DE AGREGADOS
M1	30	23.01	56	Franco arenoso	0.0568	27.6733295
M2	15	23.8	56	Franco arenoso	0.0588	33.516935

MUESTRA	% ELEMENTOS GRUESOS	% HUMEDAD	% POROSIDAD	CLASE TEXTURAL	COLE	%ESTABILIDAD DE AGREGADOS
M3	15	24.66	59	Franco arenoso	0.0284	20.6213592
M4	75	26.55	60	Franco	0.1	65.509375
M5	15	27.11	65	Franco arenoso	0.0568	31.2338983
M6	20	27.26	61	Franco	0.1022	57.5434263
M7	40	22	56	Franco arenoso	0.0647	21.2870627
M8	10	20.52	58	Franco arenoso	0.0735	22.5220406
M9	10	21.85	58	Franco arenoso	0.0994	43.2415762
M10	40	21.7	66	Franco arenoso	0.019	40
M11	15	26.06	66	Franco arenoso	0.0188	69.2779
M12	75	23.58	65	Franco arenoso	0.0294	70.9373
M13	30	17.37	48	Franco arenoso	0.034	43.2674519
M14	15	16.8	39	Franco	0.05	26.3878875
M15	10	19.24	55	Franco	0.067	24.5511364
M16	40	17.68	60	Franco	0.0755	68.99
M17	20	18.53	59	Franco arenoso	0.0994	54.43
M18	10	19.76	46	Franco arenoso	0.04	48.6265
M19	75	18.02	51	Franco arenoso	0.051	43.72
M20	30	19.67	44	Franco	0.0787	52.1199
M21	25	16.22	50	Franco arenoso	0.0281	38.46
M22	30		66	Franco	0.0204	62.1785
M23	20	24.2	54	Franco arcillo arenoso	0.0455	45.78
M24	10	25.79	63	Franco	0.09318	70.9624413
M25	50	13.04	55	Franco arenoso	0.0676	27.7092671

Tabla 14 Continuación. Resumen de propiedades físicas del cerro de Amaluca.

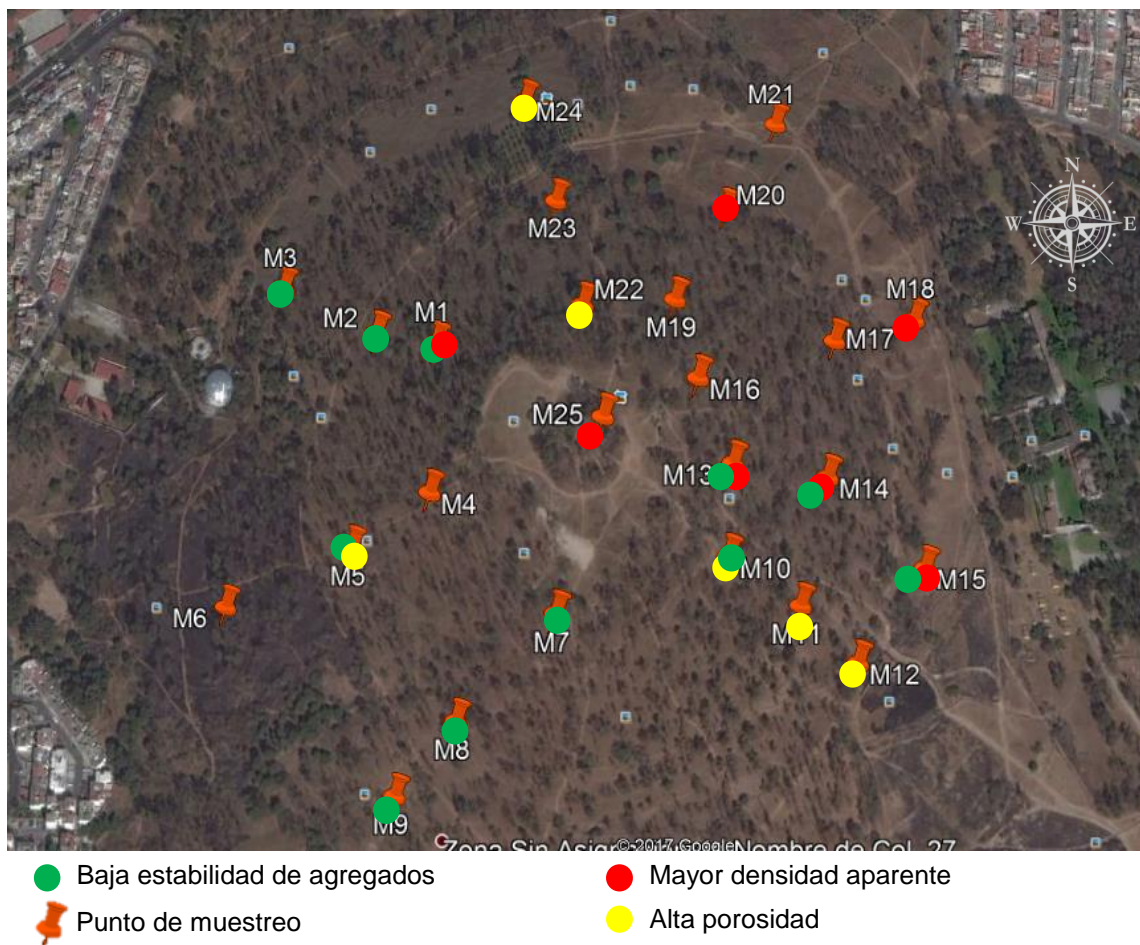


Figura 49. Representación de puntos críticos respecto a propiedades físicas.

En la tabla 14 se muestra un resumen de las propiedades más significativas y haciendo un análisis global de estas propiedades, se observa que existe un comportamiento similar entre los tres puntos que forman una ladera, principalmente en la humedad y en la porosidad. También existen datos similares en cuanto al porcentaje de pedregosidad en las zonas altas, donde los valores son más elevados, explicándose por la erosión hídrica que existe en el cerro.

Otro aspecto importante a destacar es que no se puede comprobar al 100 por ciento la relación entre el tamaño de poros, el porcentaje de porosidad, la textura y la pedregosidad. Generalmente, las arcillas presentan tamaños de poros más pequeños pero con un volumen mayor de estos, lo que representa mayor porosidad, a diferencia de los suelos arenosos, donde los poros son más grandes pero con un menor volumen,

representando menor porosidad. Estas situaciones se cumplen en algunos casos, sin embargo la alta presencia de pedregosidad modificará el tamaño y la distribución de estos poros, lo que no se consideró en las determinaciones, debido a la eliminación de estos elementos al calcular la densidad. La estructura del suelo también influirá en estos aspectos y al no considerarse en este trabajo, es otra de las razones por las que el patrón no se puede definir completamente.

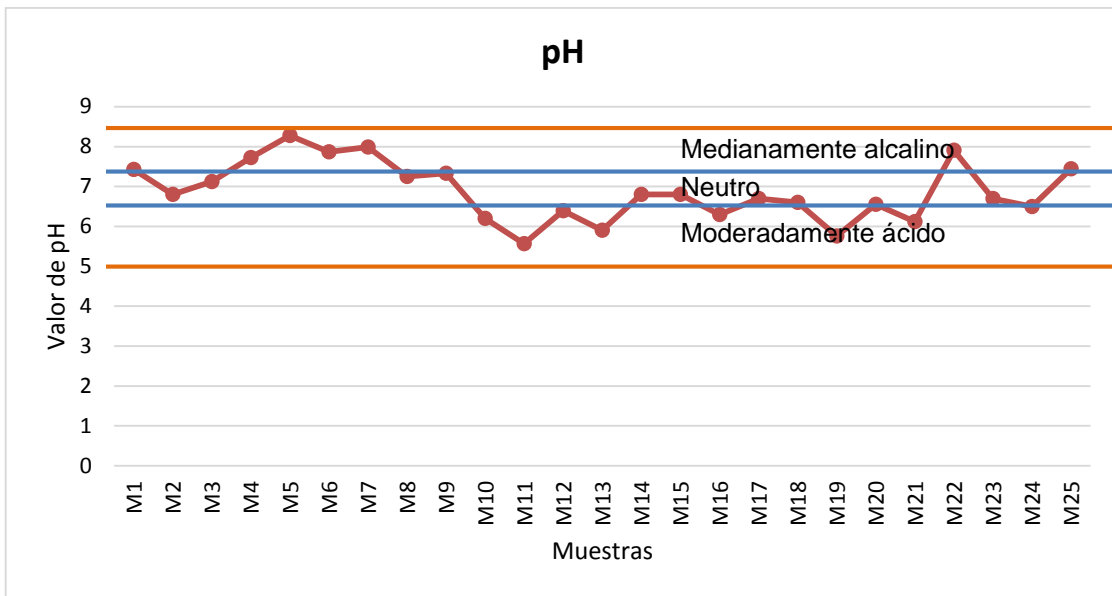
Por otro lado, la existencia mayoritaria de suelos franco arenosos puede explicarse porque con el paso de los años se ha estado deslavando el suelo y posiblemente arrastrándose hacia capas inferiores el material más pequeño, es decir, las arcillas. Con estos dos movimientos se han modificado los niveles de arena, limo y arcilla y resultan ser de clases texturales más gruesas a diferencia de lo que marca la carta edafológica, que se realizó desde hace varios años.

Algo que si se puede asegurar es que el suelo del cerro no presenta gran estabilidad de agregados, por lo que la erosión hídrica se ha hecho notoria, dejando al descubierto en varias zonas, los elementos gruesos. Estos puntos críticos pueden apreciarse mejor en la figura 49, donde se observa que los valores bajos se encuentran en la parte sur principalmente, mientras que la mayor densidad se presenta en una línea de M1 a M15.

3.3 DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES QUÍMICAS

3.3.1 pH

Los resultados de pH se presentan en la gráfica 8, así como los valores de referencia en la tabla 15 que son los establecidos por la NOM-021-SEMARNAT-2000.



Gráfica 8. Resultados de pH de las muestras del cerro de Amalucan.

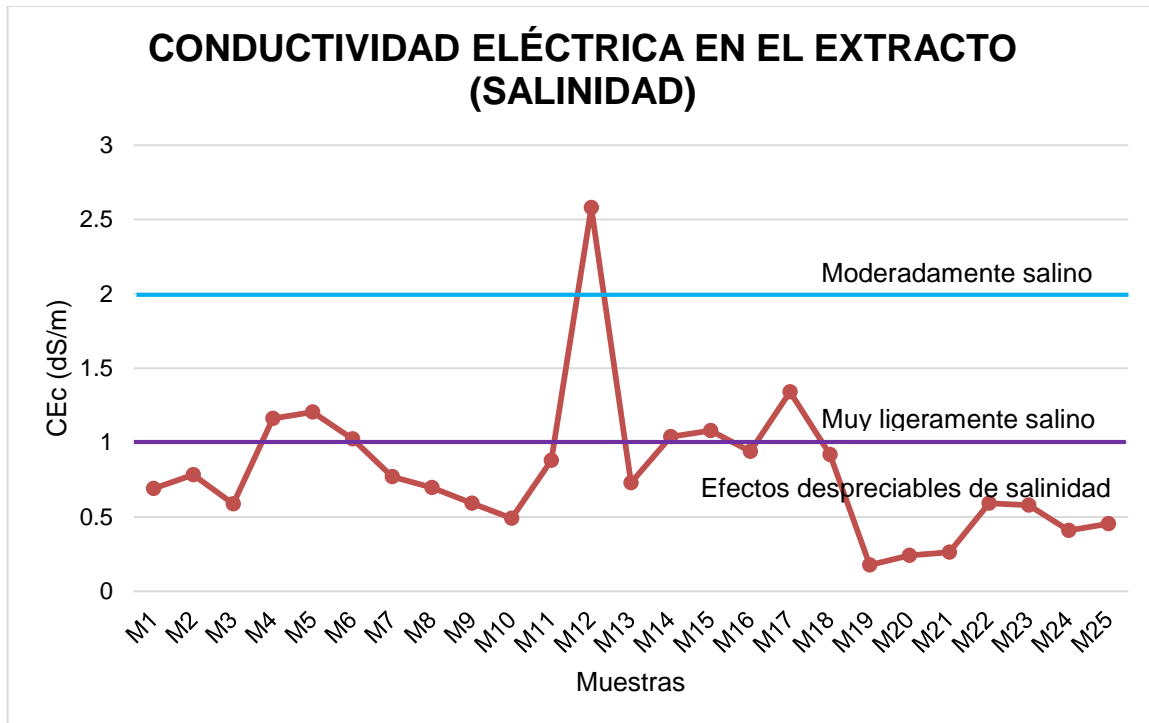
Tabla 15. Valores de referencia que presenta la NOM-021-SEMARNAT-2000.

Clasificación	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

Los valores de pH que presenta en general el cerro de Amalucan oscilan entre medianamente alcalinos y moderadamente ácidos según la NOM-021-SEMARNAT-2000, por lo que no implican mayores inconvenientes, ya que valores normales de pH y sobre el que crecen vigorosamente la mayor parte de las plantas oscila entre 5 y 7. Este hecho es debido a que la mayor parte de las sustancias nutritivas para las plantas, presentes en la solución del suelo, son fácilmente asimilables o absorbidas por las raíces en este intervalo. Las excepciones se presentan en M4, M5, M6, M7 y M22, donde los valores representan una ligera alcalinidad.

3.3.2 CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA

Los valores de conductividad eléctrica de las muestras y los efectos se muestran en la gráfica 9 y en la tabla 16 respectivamente. Las líneas representan los límites de efectos despreciables de salinidad (morada) y muy ligeramente salino (azul).



Gráfica 9. Resultados de conductividad eléctrica en las muestras del cero de Amalucan.

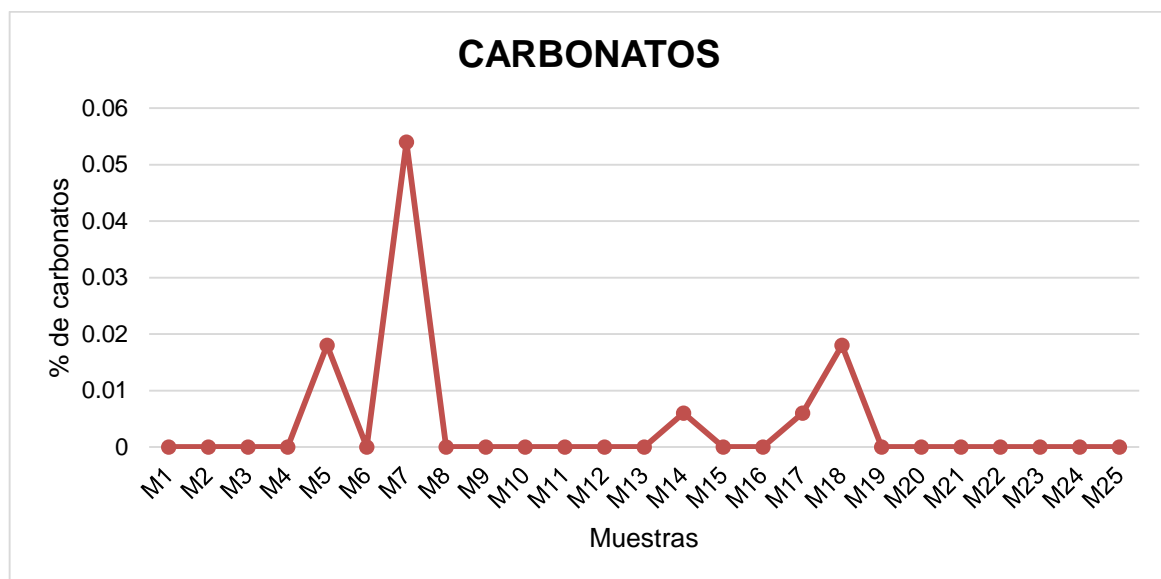
Tabla 16. Efectos de la salinidad según la NOM-021-SEMARNAT-2000.

CEc dS/m a 25°C	Efectos
< 1.0	Efectos despreciables de la salinidad
1.1 - 2.0	Muy ligeramente salino
2.1 - 4.0	Moderadamente salino
4.1 - 8.0	Suelo salino
8.1 - 16.0	Fuertemente salino
> 16.0	Muy fuertemente salino

Como puede observarse en la gráfica 9, la mayoría de las muestras se encuentran por debajo de 1 dS/m, indicando efectos despreciables de la salinidad, mientras que los puntos M4, M5, M14, M15 y M17 se encuentran dentro de la clasificación de suelos ligeramente salinos y el punto M12 como moderadamente salino. En general, el cerro de Amalucan no presenta problemas de salinidad.

3.3.3 CARBONATOS Y BICARBONATOS

En la siguiente gráfica se presentan los resultados de porcentaje de carbonatos y su interpretación en la tabla 17.



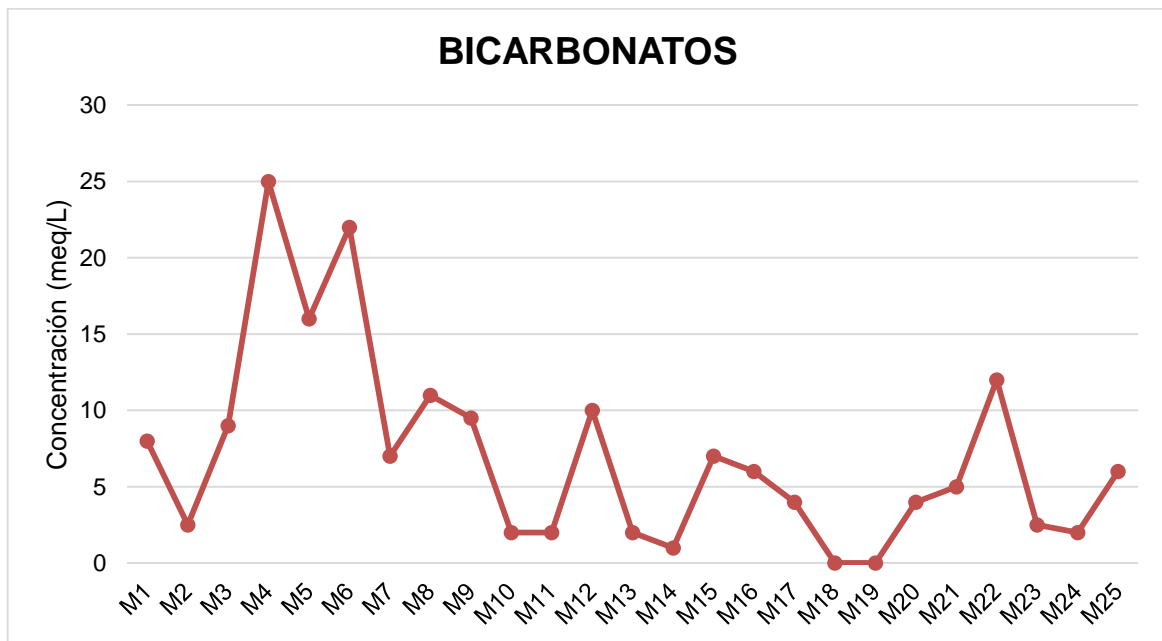
Gráfica 10. Resultado de carbonatos presentes en las muestras del cerro de Amalucan.

Tabla 17. Interpretación del porcentaje de carbonatos presentes en suelos según la NOM-021-SEMARNAT-2000.

% Carbonatos	Interpretación
0-2%	Suelo prácticamente libre de carbonatos
2-5%	Suelo ligeramente calcáreo
5-10%	Suelo moderadamente calcáreo
10-20%	Suelo calcáreo
20-40%	Suelo altamente calcáreo
>40%	Suelo extremadamente calcáreo

Debido al bajo contenido de carbonatos que se puede observar en la gráfica 10, el suelo se clasifica como libre de estos aniones, solo 5 muestras tienen presencia con concentraciones muy bajas, explicándose así, los valores de pH, ya que la presencia excesiva de este anión eleva el pH del suelo, volviéndolo más salino.

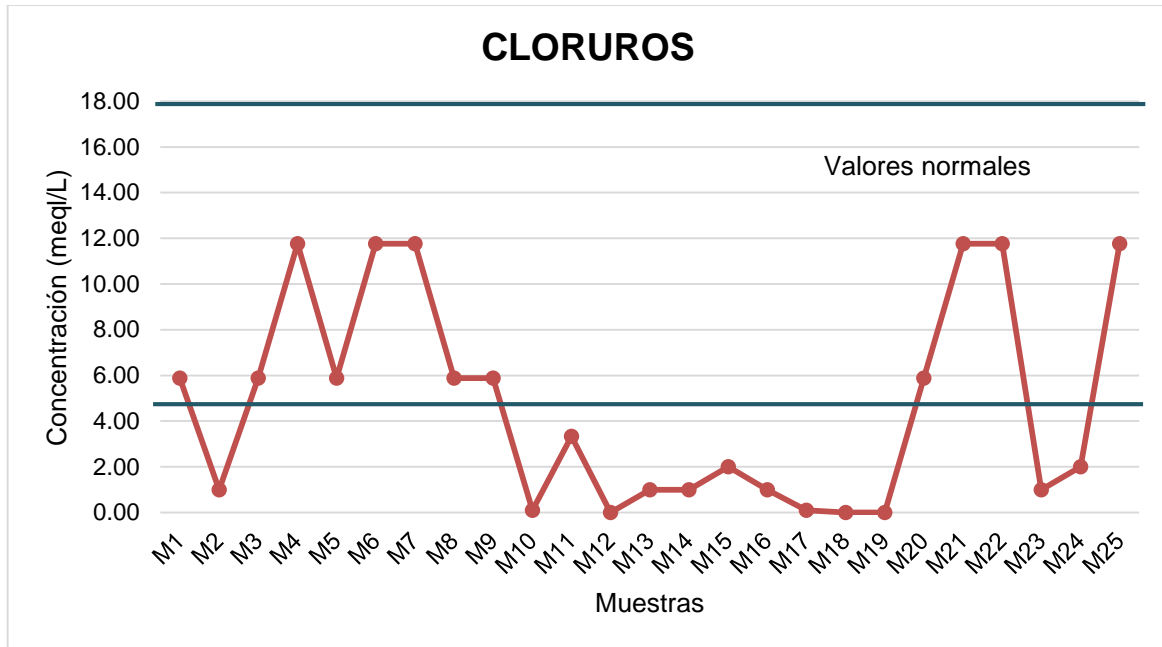
En la gráfica 11 se presentan los resultados de bicarbonatos, sin embargo, debido a que la NOM-021-SEMARNAT-2000 no registra valores de referencia, no es posible hacer una comparación precisa. De acuerdo a una fuente alterna, la página “AGRICULTURERS” (elaborada por especialistas en agricultura) señala que los valores de referencia normales para la concentración de bicarbonatos varían de 0.10 a 2.5 meq/L. De acuerdo a esta referencia, las muestras presentaron concentraciones muy elevadas de este anión, solo 9 muestras se encuentran debajo de este límite. El punto M1, M4, M5, M6, M7, M22 y M25 que presentaron valores de pH arriba de 7.3, coinciden con altos contenidos de bicarbonatos, pudiendo explicar la influencia que tienen estos aniones en el pH, confiriéndole un carácter básico. Aunque, como se mencionó, la comparación no es 100% confiable, la presencia de estos compuestos puede deberse a la combinación de estos aniones con los diferentes cationes del suelo, además de que la técnica usada para la determinación de carbonatos puede presentar interferencias y por ende alterar el resultado real.



Gráfica 11. Resultados de determinación de bicarbonatos en las muestras del cerro de Amalucan.

3.3.4 CLORUROS

En la gráfica 12 se presentan los resultados de la determinación de cloruros.

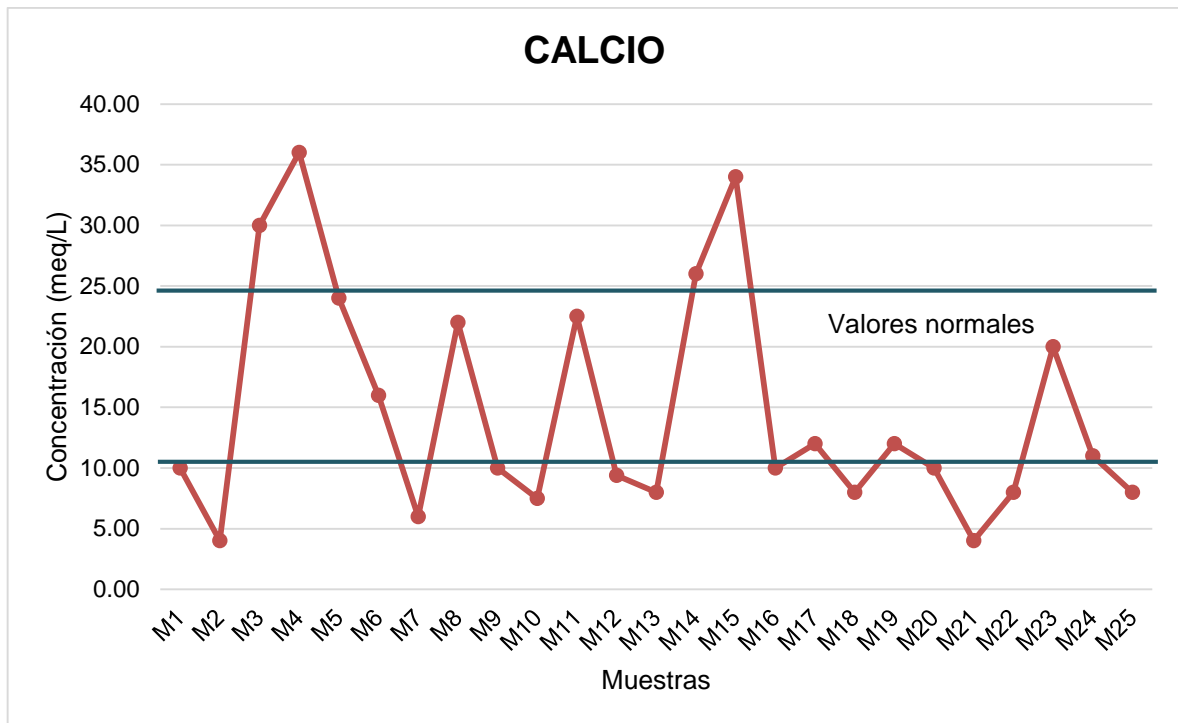


Gráfica 12. Concentración de cloruros presentes en las muestras del cerro de Amalucan.

De acuerdo a la misma página consultada, los valores óptimos de cloruros se encuentran entre 5 y 18 meq/L, por lo que el 48% de las muestras están dentro del rango y el 52% restantes están por debajo. Debido a la importancia de este en el proceso de la fotosíntesis y el ajuste osmótico, cabe mencionar que el suelo presenta deficiencias de cloruros en la zona este del cerro, ya que las puntos de M10 a M19 se localizan en esa área. Cabe mencionar que tampoco se especifican valores de referencia en la NOM-021-SEMARNAT-2000.

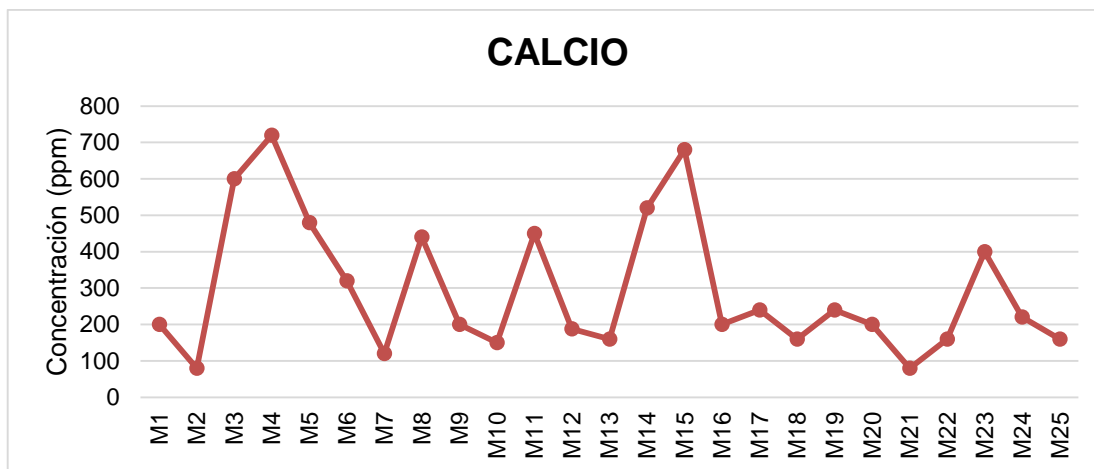
3.3.5 CALCIO

Debido a que no se presentan valores de referencia en la NOM-021-SEMARNAT-2000 para la comparación de esta determinación, se usó una fuente externa



Gráfica 13. Resultados de las concentraciones de calcio en las muestras del cerro de Amalucan en meq/L.

Las líneas en la gráfica 13 representan los límites de los valores óptimos para la concentración de calcio (AGRICULTURERS), que como se mencionó en el marco teórico, este es el catión de cambio más importante en el suelo. Estos valores oscilan entre 11 a 25 meq/L y por lo que puede observarse en el gráfico, los valores presentan un comportamiento variable, el 52% de los puntos presentan concentraciones deficientes, 32% presentan una concentración óptima y el 16% restante tienen altos niveles de calcio. Este catión se encuentra disponible en un rango de pH de 6-9, por lo que la concentración obtenida no se ve afectada por el pH del suelo.



Gráfica 14. Resultados de las concentraciones de calcio en las muestras del cerro de Amalucan en ppm.

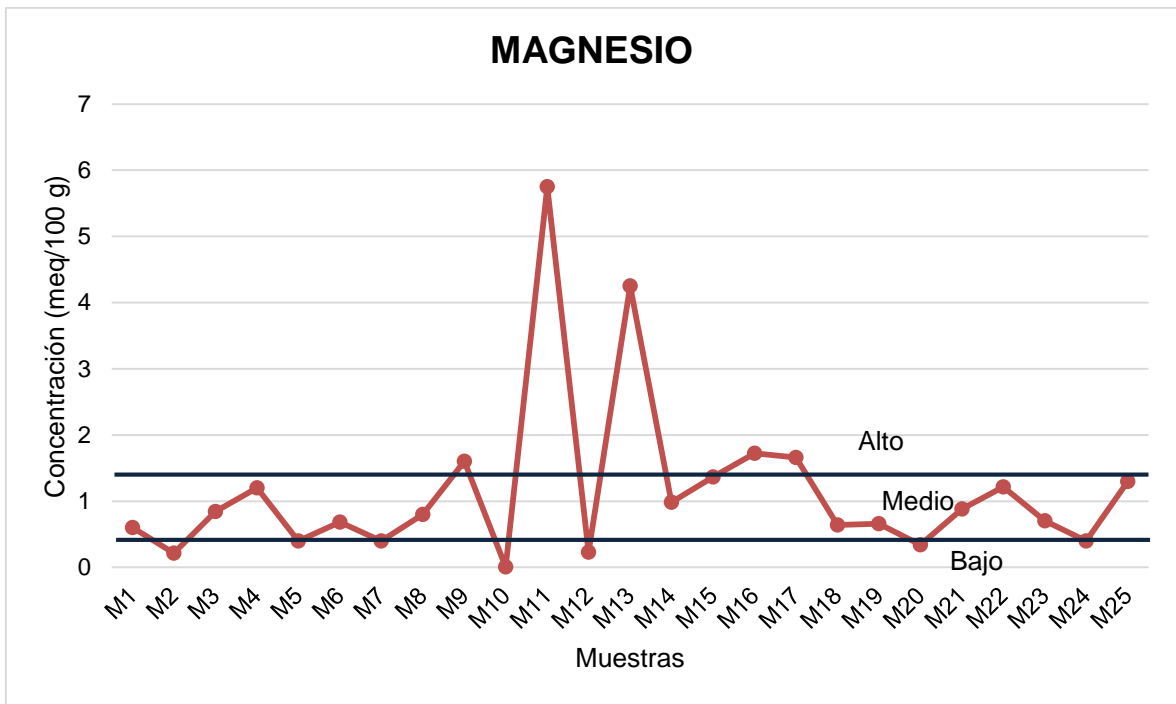
CALCIO EXTRACTABLE	
RANGOS	Ca
BAJO	< 1000 ppm <5 meq/100 g suelo
MEDIO	1000-2000 ppm 5 - 10 meq/100 g suelo
ALTO	> 2000 ppm > 10 meq/100 g suelo

Figura 50. Valores de referencia de calcio según el laboratorio AgroLab.

De acuerdo con el laboratorio AgroLab (figura 50), que aunque no es una institución reconocida, si se basa en referencias como la Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo y el Manual de Interpretación de Análisis de Suelos 2° Ed.; todos los puntos se encuentran dentro del límite del rango bajo, lo que representaría un problema debido a la importancia de este catión. La diferencia entre ambas fuentes de referencia es grande, pero sin lugar a dudas, los puntos M1, M2, M7, M9, M10, M12, M13, M16, M17, M18, M19, M20, M21, M22, M24 y M25 presentan condiciones aún más críticas por las bajas concentraciones de calcio.

3.3.6 MAGNESIO

Los resultados de las determinaciones de magnesio y los valores de referencia para compararlos se presentan en la gráfica 15 y en la figura 51 respectivamente.



Gráfica 15. Resultados de las determinaciones de magnesio en las muestras del cerro de Amaluacan.

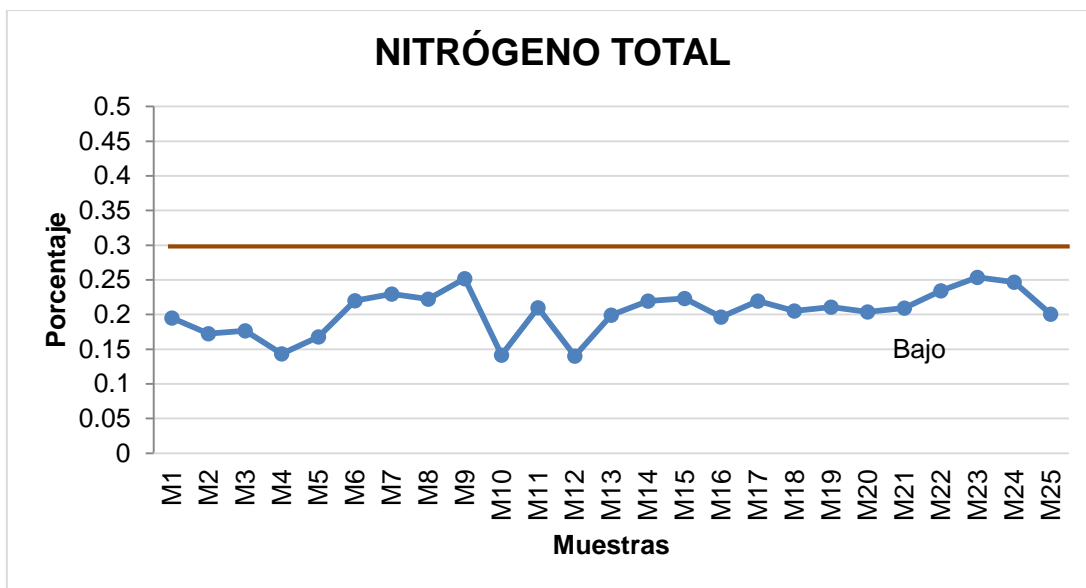
MAGNESIO EXTRACTABLE	
RANGOS	Mg
BAJO	< 60 ppm <0.5 meq/100 g suelo
MEDIO	60-180 ppm 0.5 - 1.5 meq/100 g suelo
ALTO	> 180 ppm > 1.5 meq/100 g suelo

Figura 51. Valores de referencia para Magnesio según AgroLab.

Ya se ha mencionado que el magnesio es el segundo catión más importante para el intercambio catiónico y un elemento nutritivo para las plantas. El 28% de las muestras están en un rango bajo de acuerdo a AgroLab, la mayoría de las muestras (52%) tienen una concentración media de magnesio y el 20% restantes tienen una alta concentración de Mg, en especial M12 y M13. Se puede afirmar que en general no existen mayores problemas en cuanto a la presencia de este catión en el suelo.

3.3.7 NITRÓGENO

En la gráfica 16 se muestran los resultados de las determinaciones de nitrógeno y en la figura 52 los valores de referencia establecidos en la NOM-021-SEMARNAT-2000.



Gráfica 16. Resultados de nitrógeno en las muestras del cerro de Amalucan.

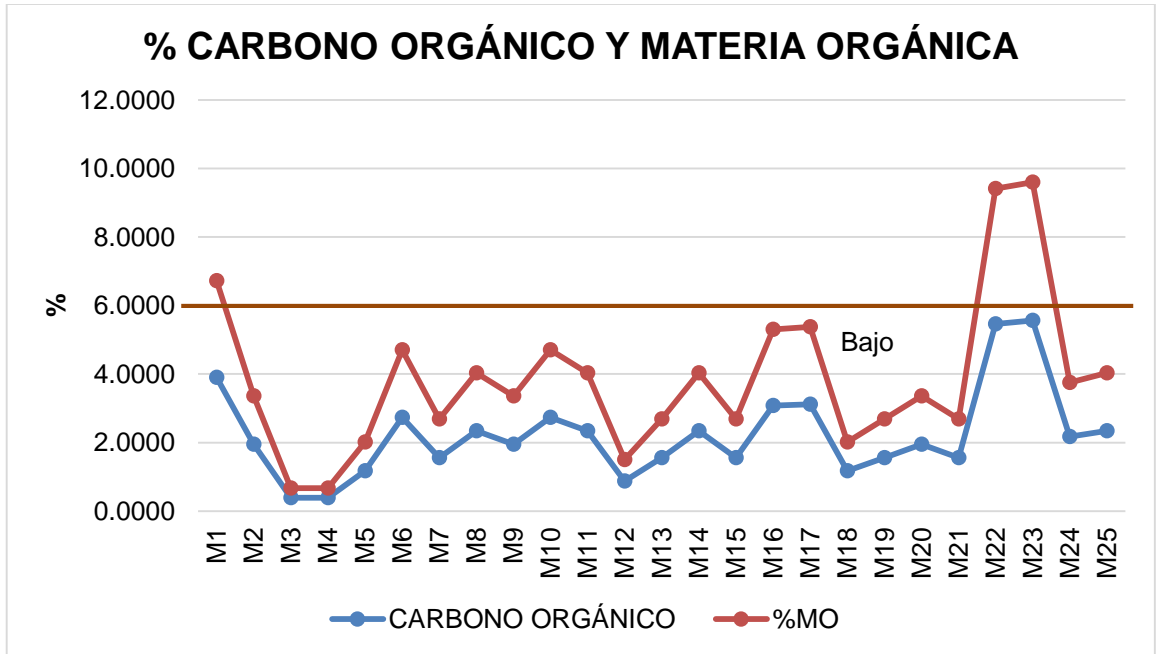
Clase	Nitrógeno total %
Bajo	< 0.30
Medio	0.30 - 0.80
Alto	> 0.80

Figura 52. Valores de referencia para el porcentaje de nitrógeno total en suelos volcánicos.

Las muestras se encuentran en la clase baja de acuerdo al porcentaje de nitrógeno total presente en el suelo. Estos valores son comparados con los límites establecidos en la NOM-021-SEMARNAT-2000 para suelo volcánicos. Se sabe que este elemento es indispensable y determinante para diversas funciones, por lo que es preocupante la cantidad presente en el cerro en general.

3.3.8 CARBONO ORGÁNICO Y MATERIA ORGÁNICA

En la gráfico 17 se presentan los valores de carbono orgánico y materia orgánica resultantes, así como la interpretación según la NOM-021SEMARNAT-2000 en la figura 53.



Gráfica 17. Resultados de carbono orgánico y materia orgánica en el cerro de Amalucan.

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

Figura 53. Valores de referencia de materia orgánica según la NOM-021-SEMARNAT-2000

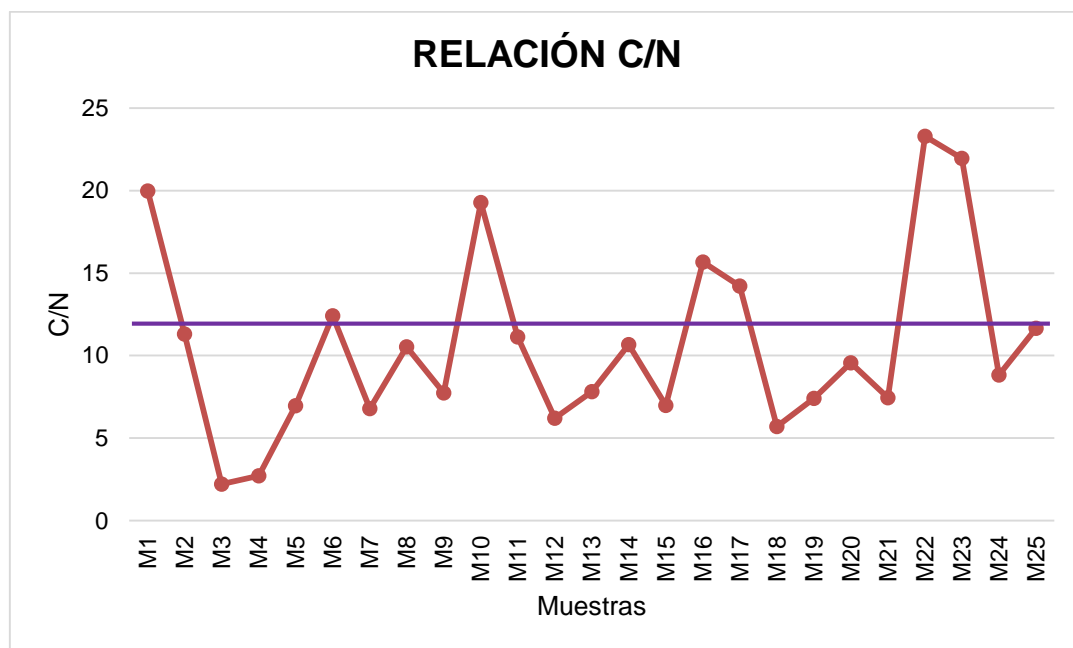
Debido a que el origen del suelo es volcánico, los valores a considerar como referencia son más elevados a comparación de los suelos no volcánicos. Como puede observarse, la mayoría de las muestras presenta un bajo y muy bajo contenido de materia orgánica, tan solo 3 muestras que representan el 12%, están dentro de la clase media, demostrando así la deficiencia y alteración del suelo del cerro en aspectos como la

estructuración, porosidad, aireación, movimiento del agua, la capacidad de retención de agua disponible, los procesos de intercambio iónico, la capacidad tampón frente a los cambios de pH, así como la liberación de nutrientes, entre otros aspectos mencionados en el marco teórico.

Las muestras M4 y M12 resultaron con cantidades muy bajas de materia orgánica, aspecto que puede relacionarse con el alto porcentaje de pedregosidad.

3.3.8.1 RELACIÓN CARBONO/NITRÓGENO

Obtenidos los resultados de porcentaje de Nitrógeno y Carbono, se calculó la relación carbono/nitrógeno, obteniéndose los siguientes resultados.



Gráfica 18. Resultados de la relación carbono/nitrógeno de las muestras del cerro de Amalucan.

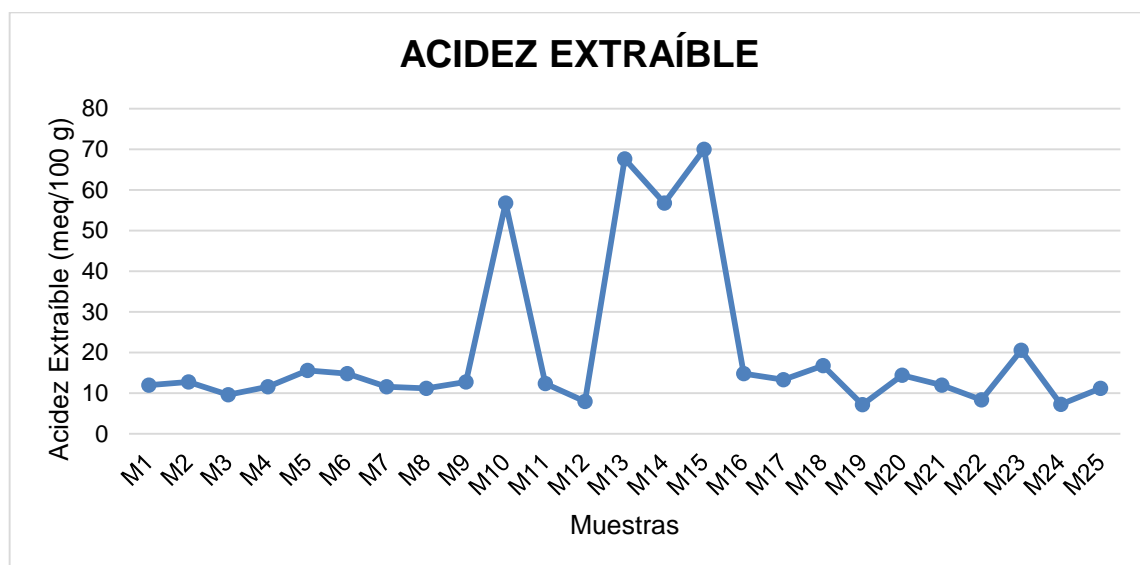
Como se mencionó en el marco teórico, la relación C/N indica la potencialidad del suelo para transformar la materia orgánica en nitrógeno mineral, por lo que se considera que una relación C/N entre 10 y 12 produce una correcta liberación de nitrógeno. Tomando esto en cuenta y como se observa en la gráfica 18 con la línea morada, los puntos M2, M6, M8, M11, M14 y M25 presentan buenas condiciones para la liberación de nitrógeno, mientras que los puntos que se encuentran por debajo pueden presentar liberaciones

excesivas, en especial los puntos M3 y M4, y liberaciones muy lentas los puntos M1, M10, M22 y M23.

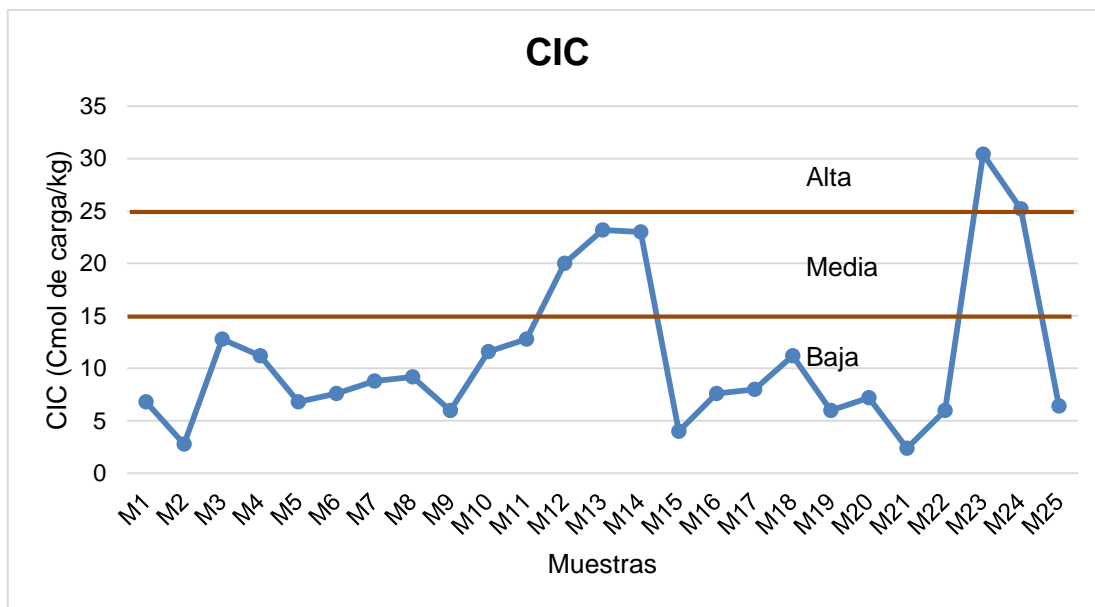
También se maneja que una relación C/N alrededor de 32 constituye el punto de equilibrio para la descomposición de los materiales orgánicos en unas semanas, debido a que ninguna muestra obtuvo tal valor se considera que las condiciones permiten la ocurrencia de una cierta mineralización al tiempo que se descompone la materia orgánica, es decir, se realiza antes la mineralización del nitrógeno.

3.3.9 ACIDEZ EXTRAÍBLE Y CAPACIDAD DE INTERCAMBIO CATIÓNICO

En la gráfica 19 se presentan los resultados de las determinaciones de acidez extraíble, posteriormente, la gráfica 20 se muestra los resultados de CIC y su interpretación en la figura 47, según la NOM-021-SEMARNAT-2000.



Gráfica 19. Resultados de acidez extraíble de las muestras del cerro de Amalucan.



Gráfica 20. Resultados de CIC en las muestras del cerro de Amalucan.

Clase	CIC (Cmol(+) Kg ⁻¹)
Muy alta	> 40
Alta	25 - 40
Media	15 - 25
Baja	5 - 15
Muy baja	> 5

Figura 54. Interpretación de CIC según la NOM-021-SEMARNAT-2000.

Los valores de acidez extraíble no se comparan con otros de referencia debido a que solo se utilizó para eliminar los iones H⁺ y Al³⁺ que ocupaban posiciones de intercambio. Cabe mencionar que los puntos M10, M13, M14 y M15, que presentan un valor elevado de acidez extraíble en comparación al resto, pueden presentar problemas de acidez y por ende de intercambio para los nutrientes esenciales.

De acuerdo a la comparación de estos resultados con los valores de referencia de la NOM-021-SEMARNAT-2000, presentados en la figura 54, se puede observar que el 80% de los puntos tienen una capacidad de intercambio catiónica baja y muy baja, tan solo el 12% se encuentra dentro de una clase media en cuando a CIC y únicamente dos muestras que representan el 8% tienen una capacidad de cambio alta, comprobando así

la baja capacidad del suelo para intercambiar las bases y asegurar la disponibilidad de nutrientes para las plantas.

3.3.10 RESUMEN DE PROPIEDADES QUÍMICAS

Analizando los diversos resultados de propiedades químicas, se observa que algunos parámetros están completamente fuera de los rangos normales, principalmente en las determinaciones de calcio, donde las concentraciones son muy bajas según la referencia de AgroLab, y en bicarbonatos, donde los resultados presentan valores muy altos en ciertos puntos. Como ya se mencionó, el ligero pH alcalino que resultó del extracto de saturación puede explicarse por la presencia de estos compuestos.

En general, el cerro no tiene problemas de pH que afecten la disponibilidad de nutrientes ni alta conductividad eléctrica que indique salinidad, pero si tiene concentraciones deficientes de algunos compuestos, así como baja capacidad de intercambio catiónico que si puede afectar la disponibilidad de nutrientes al impedir el cambio de cationes aprovechables por las plantas. Esta capacidad si tiene que ver con la acidez extraíble, que en muchos casos resultó elevada. En la figura 55 se puede apreciar que la baja CIC está presente en casi toda la zona, al igual que la elevada presencia de bicarbonatos.

Otro aspecto muy importante es la baja concentración de materia orgánica, así como de nitrógeno. El bajo contenido de materia orgánica puede explicarse por las condiciones pedregosas del cerro, así como por la vegetación existente, ya que las hojas que caen al suelo son mayoritariamente de eucalipto y como se mencionó en el marco teórico, la cubierta muerta del eucalipto no se descompone con tanta rapidez. En este aspecto también influye la humedad, temperatura y oxígeno como factores físicos pero también los biológicos, es decir, los microorganismos del suelo, sin embargo, el presente trabajo no contempla el estudio de la actividad microbiológica. En cuanto al nitrógeno, solo cabe mencionar que su baja concentración también puede deberse a la ausencia de ciertos microorganismos.

En la figura 55 también se observa que existe una moderada salinidad en el punto M12, coincidiendo con su baja elevación respecto al resto del terreno, por lo que se puede deducir que debido a la pendiente y movimiento del agua, se han depositado compuestos salinos en esa zona.

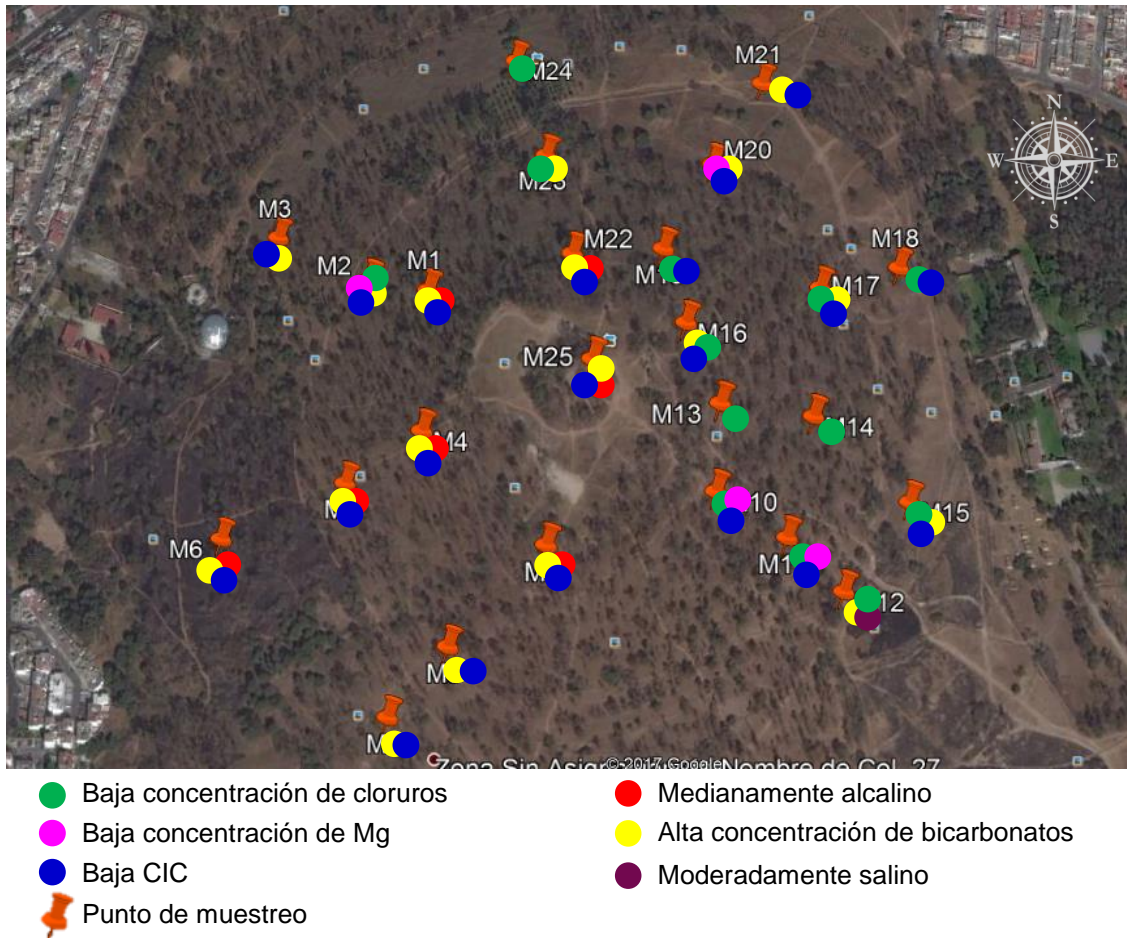


Figura 55. Representación de puntos críticos respecto a propiedades químicas.

3.4 DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES HIDROLÓGICAS

En la tabla 18 se muestran los resultados de las características y propiedades hidrológicas determinadas por el software “Soil Water Characteristics”. Mientras que la conductividad hidráulica saturada representa las condiciones cuando los poros del suelo están llenos de agua, los resultados de las tres últimas filas representan el potencial osmótico, matricial + osmótico y la conductividad hidráulica al momento del muestreo, es decir, cuando existe cierta humedad sin llegar a la saturación. Después de la tabla se muestran las gráficas de estos potenciales y la conductividad hidráulica de manera individual, ya que el programa no grafica datos de diferentes muestras al mismo tiempo. En el eje X se representa el porcentaje de humedad, en el eje Y del lado derecho se encuentra la conductividad hidráulica en mm/h y en el eje Y del lado izquierdo se encuentra el potencial en KPa.

Tabla 18. Resultados de las características y propiedades hidrológicas.

MUESTRA	Punto de marchitamiento (%)	Capacidad de campo (%)	Saturación (%)	Agua disponible (%)	Conductividad hidráulica de saturación (mm/h)	Potencial matricial (kPa)	Matricial + osmótico (kPa)	Conductividad hidráulica (mm/h)
M1	12.5	23.6	50.9	8	29.56	39	95	2.37×10^{-4}
M2	11.2	20.4	41.8	8	19.04	28	79	3.09×10^{-3}
M3	8.3	16.9	39.4	7	23.22	22	57	3.99×10^{-2}
M4	6.7	19.3	43.1	6	16.06	24	94	1.49×10^{-1}
M5	11.4	24	49.2	11	32.56	29	108	1.45×10^{-2}
M6	10.8	25.5	55.2	12	48.44	31	104	1.44×10^{-2}
M7	9	18.2	41.6	6	16.29	28	83	2.93×10^{-3}
M8	9.6	21.1	49	10	46.69	39	99	9.43×10^{-4}
M9	10.7	20.1	44.1	9	28.84	31	75	8.76×10^{-4}
M10	10.3	20	55	6	50.07	32	77	8.98×10^{-5}
M11	11.8	25.3	54.2	12	47.46	32	100	4.44×10^{-3}
M12	14.5	25.9	55.7	6	24.91	59	280	5.46×10^{-5}
M13	11.7	19	28.3	5	1.3	65	106	1.5×10^{-4}
M14	16.4	27	33.6	9	0.63	1174	1249	2.39×10^{-6}
M15	13.5	24	37.7	9	5.77	141	219	1.26×10^{-4}
M16	12.2	29	59.1	10	34.81	276	389	3.14×10^{-5}
M17	8.6	25	59.9	13	82.03	91	247	9.8×10^{-4}

MUESTRA	Punto de marchitamiento (%)	Capacidad de campo (%)	Saturación (%)	Agua disponible (%)	Conductividad hidráulica de saturación (mm/h)	Potencial matricial (kPa)	Matricial + osmótico (kPa)	Conductividad hidráulica (mm/h)
M18	6.8	17.8	39.6	10	17.66	31	91	2.2×10^{-2}
M19	8.3	19.2	45.2	5	18.23	45	60	2.81×10^{-4}
M20	12.2	24.6	42.6	9	9.33	111	130	2.3×10^{-4}
M21	7.8	17.4	45.1	7	36.24	46	73	1.17×10^{-4}
M22	14.5	33.8	67.2	14	56.35	432	509	1.72×10^{-5}
M23	22	33	49.9	9	8.25	603	647	1.26×10^{-6}
M24	13	29.2	54.5	15	36.20	60	91	2.52×10^{-3}
M25	10.6	19	40.1	4	9.21	385	435	1.48×10^{-7}

Tabla 18 Continuación. Resultados de las características y propiedades hidrológicas.

— Conductividad hidráulica — Presión matricial — Presión matricial+osmótica

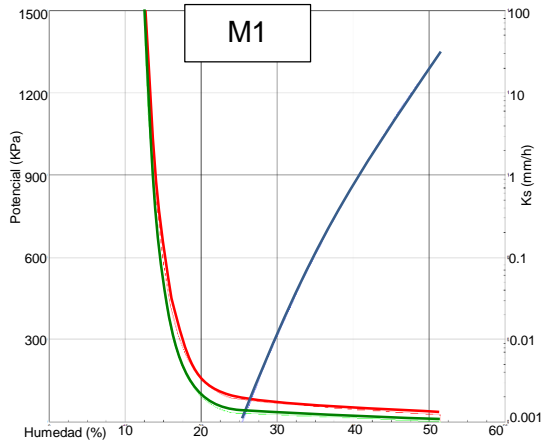


Figura 56. Curvas de propiedades hidrológicas para M1

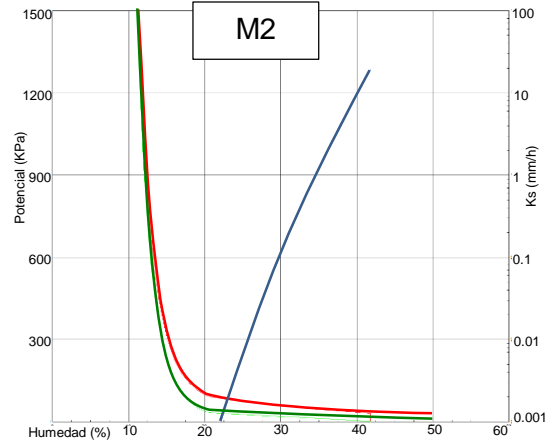


Figura 57. Curvas de propiedades hidrológicas para M2

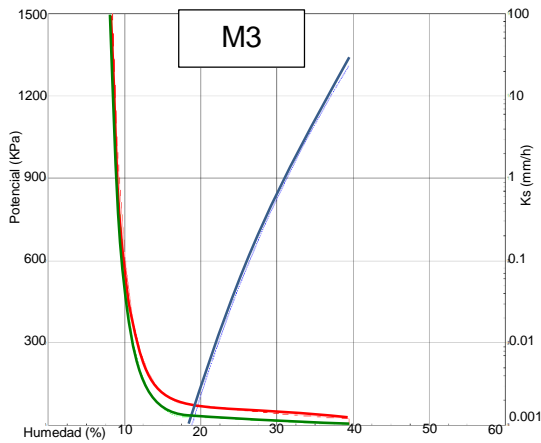


Figura 58. Curvas de propiedades hidrológicas para M3

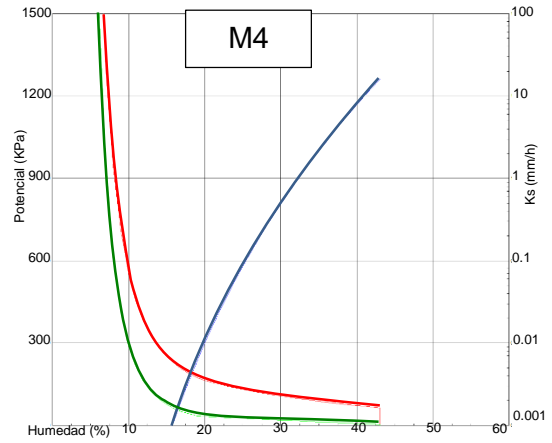


Figura 59. Curvas de propiedades hidrológicas para M4

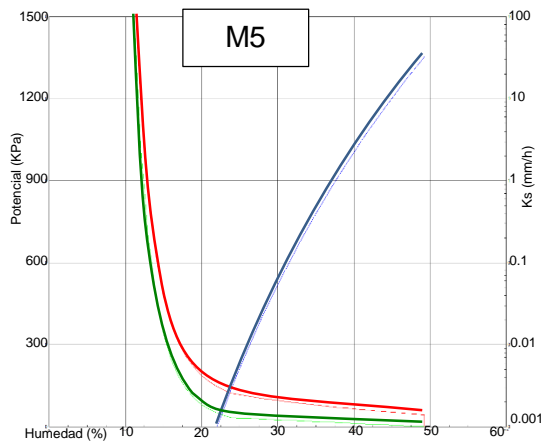


Figura 60. Curvas de propiedades hidrológicas para M5

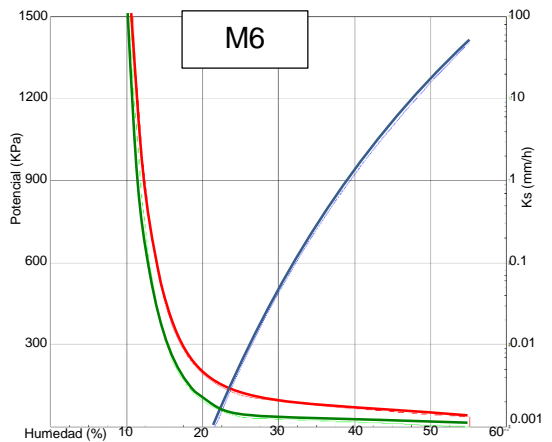


Figura 61. Curvas de propiedades hidrológicas para M6

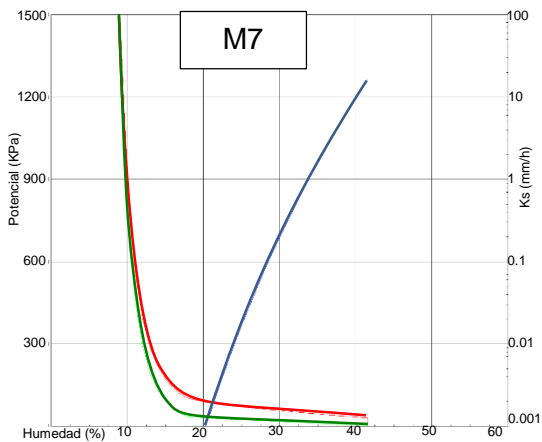


Figura 62. Curvas de propiedades hidrológicas para M7

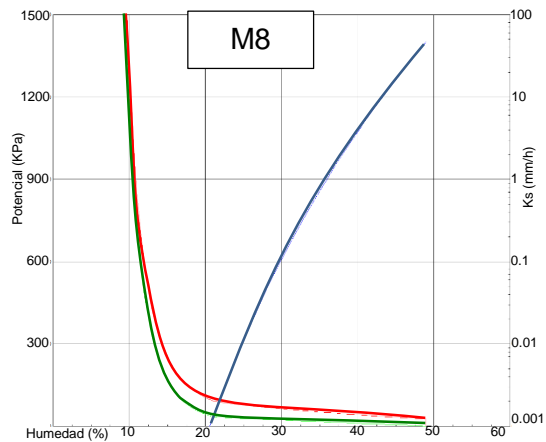


Figura 63. Curvas de propiedades hidrológicas para M8

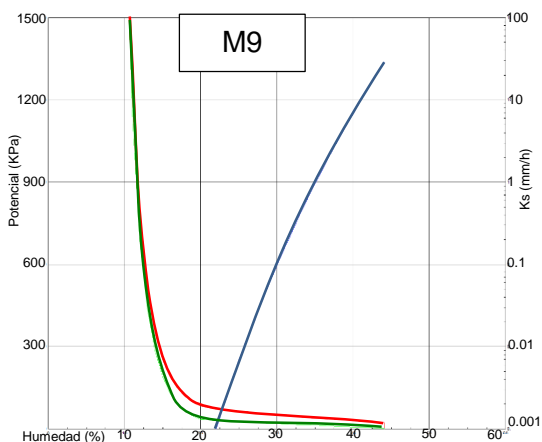


Figura 64. Curvas de propiedades hidrológicas para M9

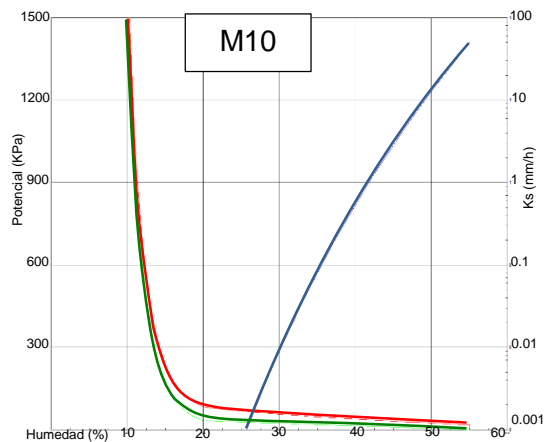


Figura 65. Curvas de propiedades hidrológicas para M10

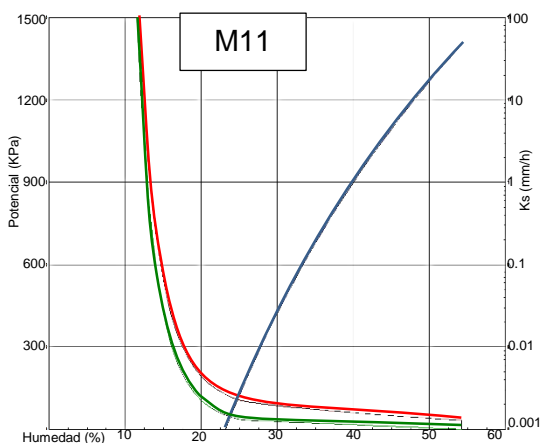


Figura 66. Curvas de propiedades hidrológicas para M11

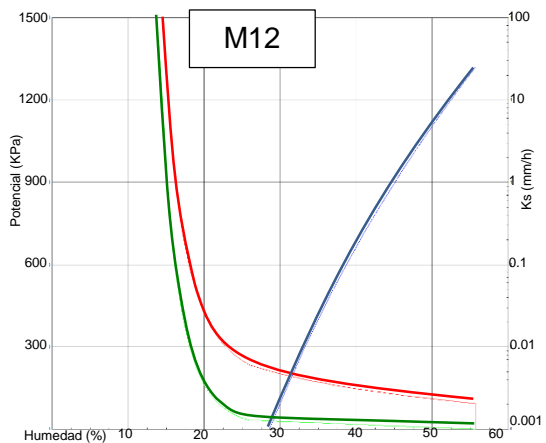


Figura 67. Curvas de propiedades hidrológicas para M12

— Conductividad hidráulica — Presión matricial — Presión matricial+osmótica

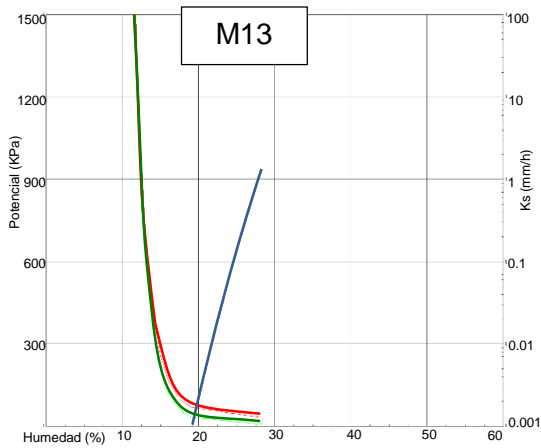


Figura 68. Curvas de propiedades hidrológicas para M13

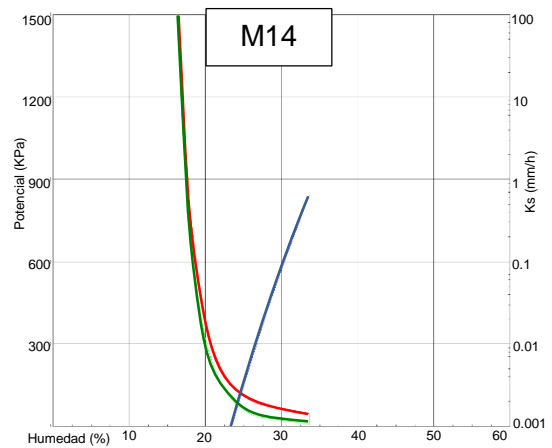


Figura 69. Curvas de propiedades hidrológicas para M14

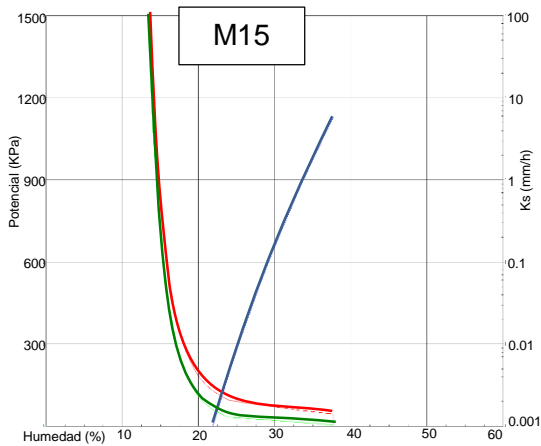


Figura 70. Curvas de propiedades hidrológicas para M15

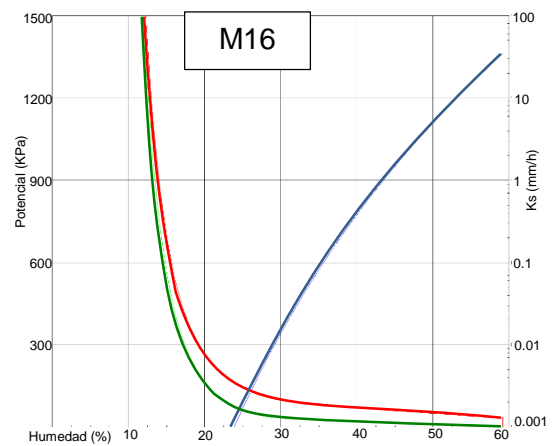


Figura 71. Curvas de propiedades hidrológicas para M16

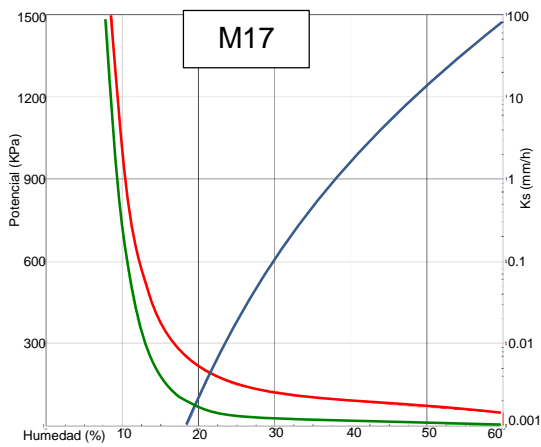


Figura 72. Curvas de propiedades hidrológicas para M17

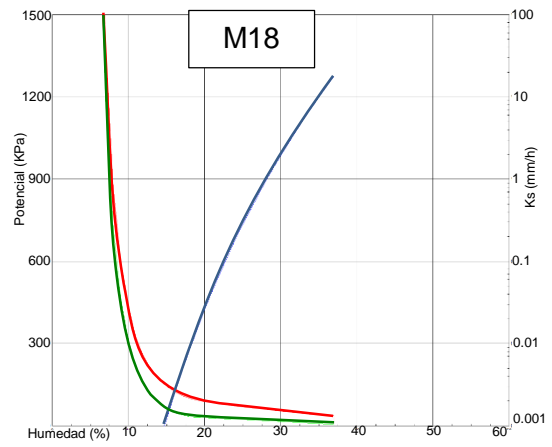


Figura 73. Curvas de propiedades hidrológicas para M18

— Conductividad hidráulica — Presión matricial — Presión matricial+osmótica

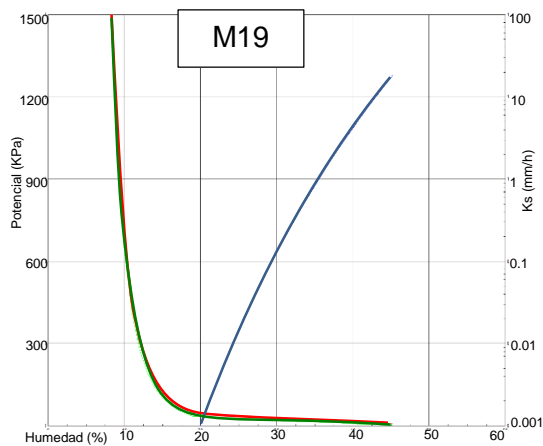


Figura 74. Curvas de propiedades hidrológicas para M19

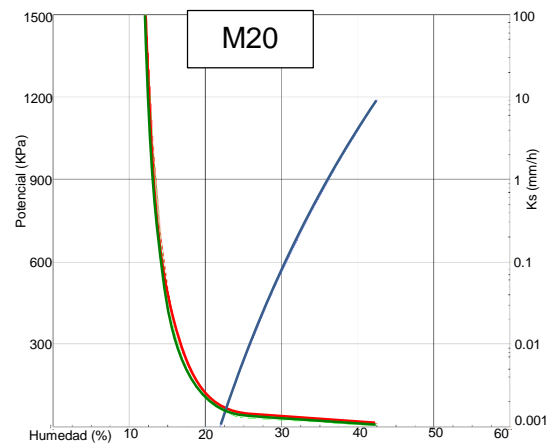


Figura 75. Curvas de propiedades hidrológicas para M20

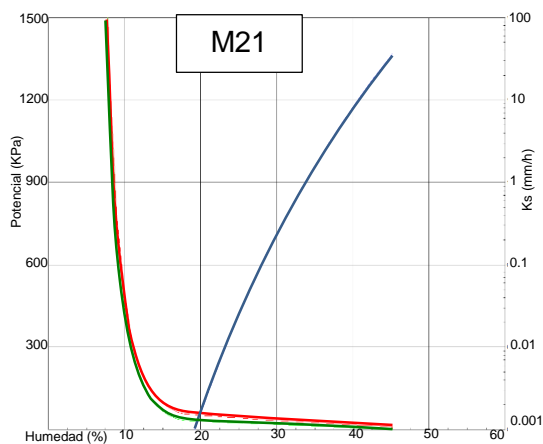


Figura 76. Curvas de propiedades hidrológicas para M21

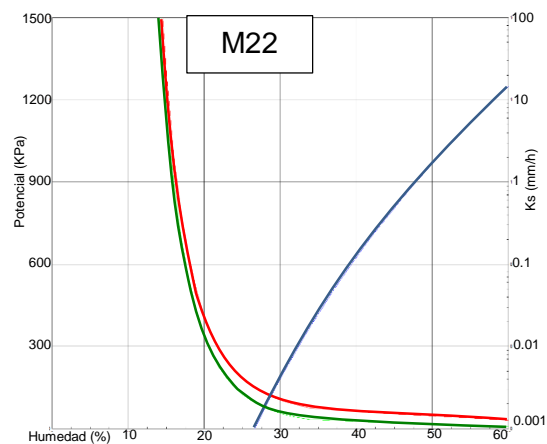


Figura 77. Curvas de propiedades hidrológicas para M22

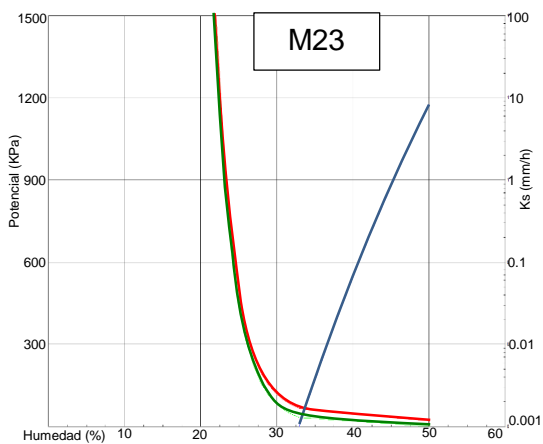


Figura 78. Curvas de propiedades hidrológicas para M23

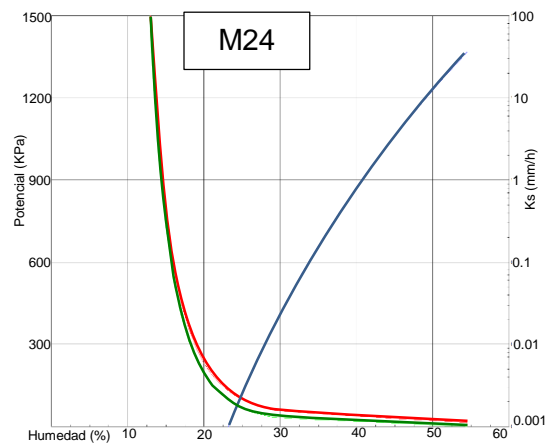


Figura 79. Curvas de propiedades hidrológicas para M24

— Conductividad hidráulica — Presión matricial — Presión matricial+osmótica

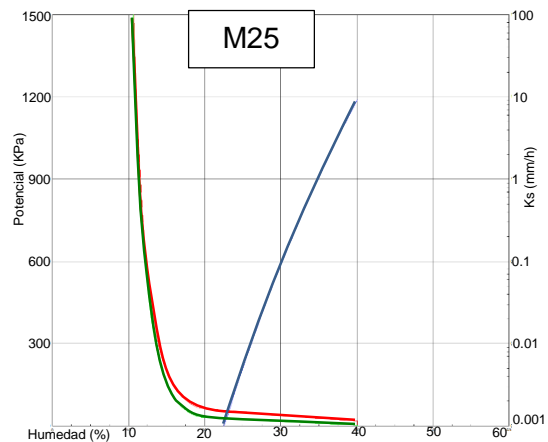


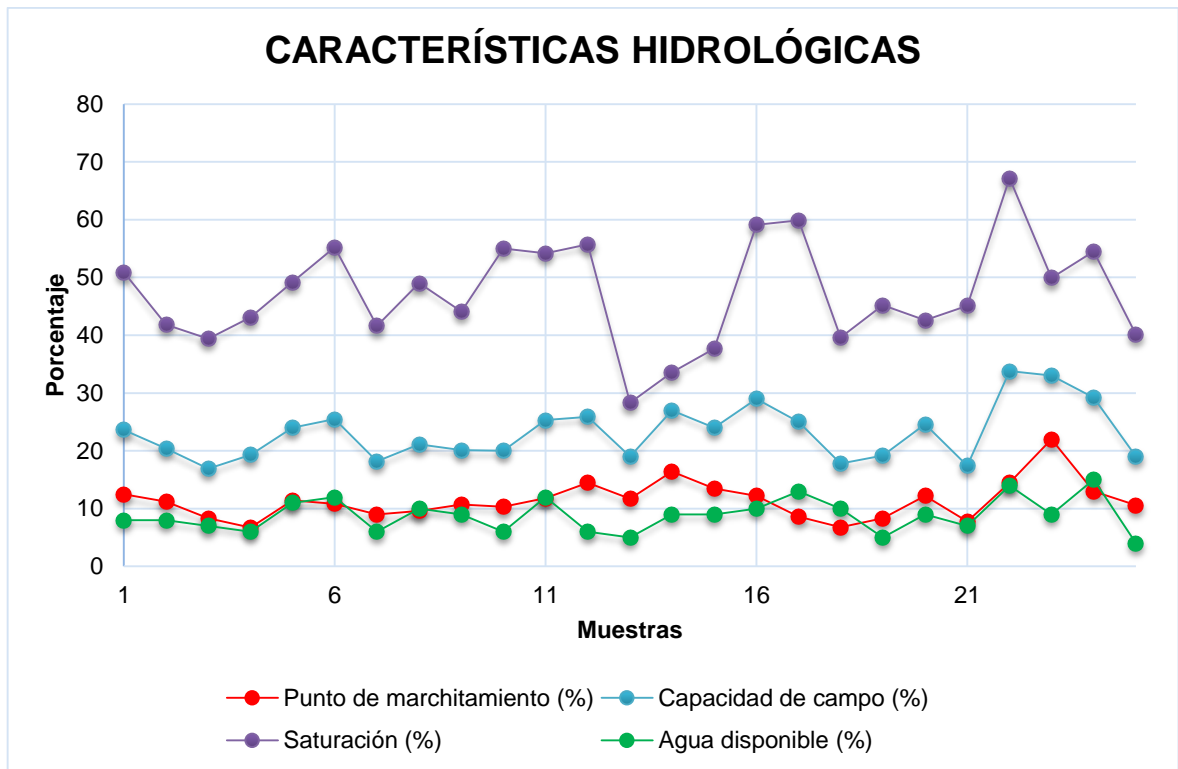
Figura 80. Curvas de propiedades hidrológicas para M25

— Conductividad hidráulica — Presión matricial — Presión matricial+osmótica

En cada gráfica puede observarse la diferencia que existe entre la curva de potencial matricial y la de potencial matricial + osmótico. En las muestras en donde se presenta una curva de potencial matricial + osmótico más pronunciada o más separada de la de potencial matricial, se puede afirmar que el trabajo que debe efectuar la planta para extraer la humedad del suelo es mayor y esto se debe a la salinidad del suelo. Esta situación se presenta en pocos puntos porque la salinidad, que es el factor que actúa directamente en el potencial osmótico, resultó casi despreciable, es por esto que las muestras M4, M5, M12 y M17 presentan una curva más visible.

En estas figuras también se puede apreciar el rango de humedad en el que actúan los potenciales y la conductividad hidráulica, por lo que para efectos de determinar alguno de estos valores a un determinado porcentaje de humedad, basta con intersectar el valor de humedad con la curva correspondiente.

Es importante resaltar que a mayor cantidad de materia orgánica el rango de humedad en el que se pueden hallar los potenciales y la conductividad hidráulica, se amplía, reafirmando así la importancia de la materia orgánica en el suelo.



Gráfica 21. Características hidrológicas de las muestras del cerro de Amalucan.

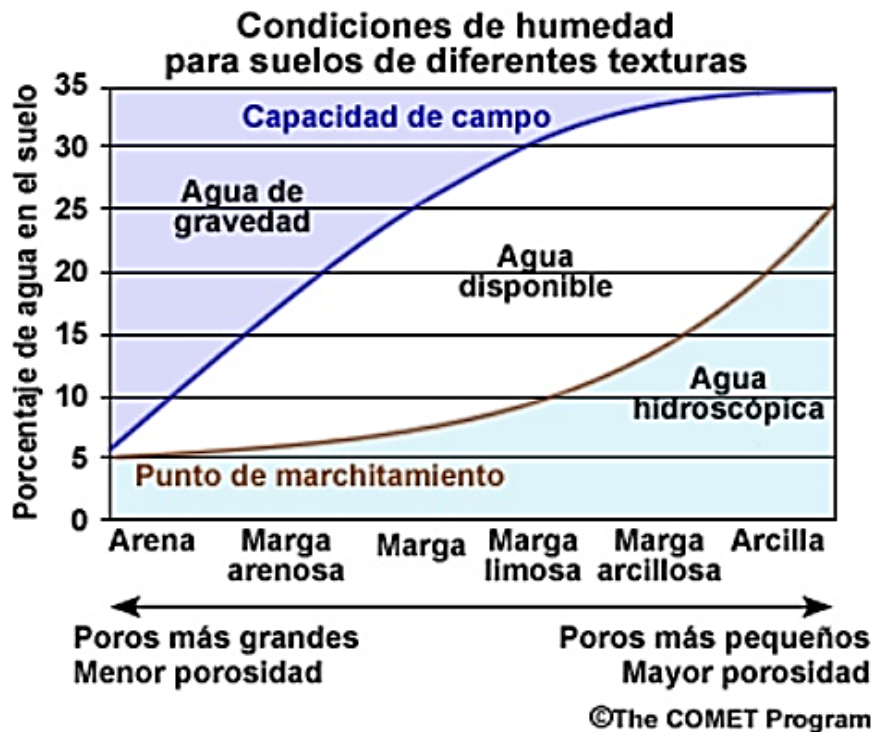
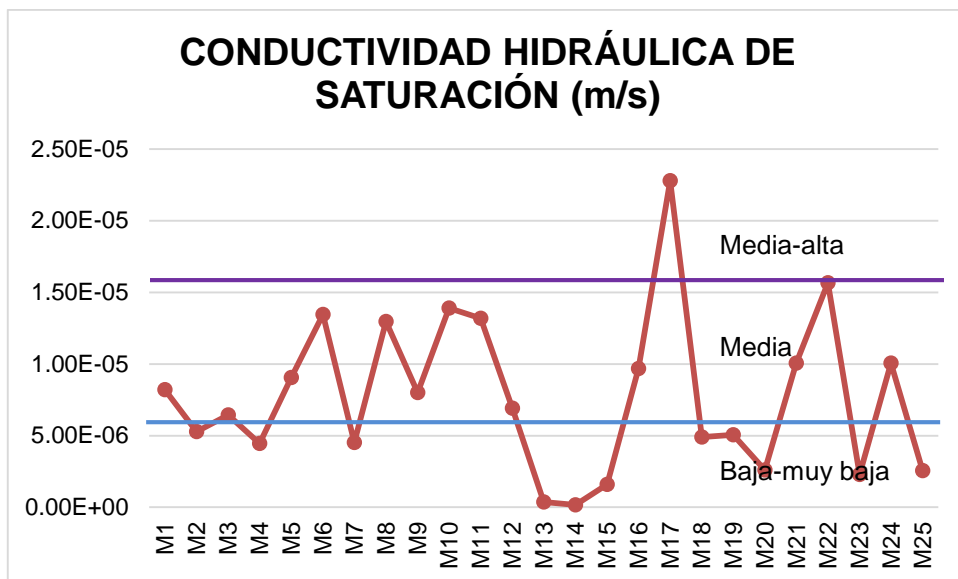


Figura 81. Condiciones de humedad para suelos con diferentes texturas. COMET Program

Como puede observarse en la gráfica 21, la mayoría de los porcentajes de saturación varían de 40 a 60%. Este porcentaje se ve más afectado por la materia orgánica y la compactación, el porcentaje de saturación disminuye a menor cantidad de materia orgánica y a mayor grado de compactación, es por esta última relación que el punto M13 presenta un 28.3% de saturación, al tener una compactación alta y el punto M22 un 67.2% al tener una baja compactación.

Los porcentajes de capacidad de campo, punto de marchitamiento y agua disponible no se encuentran en su mayoría dentro de los rangos según su textura, comparándolos con la figura 81, esto se debe a las diversas características que presenta el cerro. A menor cantidad de materia orgánica y a menor salinidad, también se reduce el punto de marchitamiento. En el caso de la capacidad de campo, ésta se reduce al bajar el contenido de materia orgánica y al aumentar la compactación. El agua disponible, que se encuentra entre estos dos valores se ve afectada por más parámetros ya que aumenta a mayor contenido de materia orgánica, a menor salinidad, a menor porcentaje de grava y a menor grado de compactación. De aquí radica la importancia de tener las condiciones físicas y químicas óptimas para asegurar una buena disponibilidad de agua que las plantas puedan aprovechar.

Por otro lado, en la gráfica 22 puede observarse que el 52% de las muestras presentan una conductividad hidráulica media, el 44 % una conductividad baja y una muestra, que representa el 4%, una conductividad alta. Esto deja en claro que la conductividad hidráulica en el cerro presenta condiciones medianamente óptimas para el movimiento de agua por los poros del suelo una vez que se ha llegado al punto de saturación. Se puede decir que el movimiento del agua en el suelo no presenta mayores problemas, sin embargo si es necesario prestar atención a las características que hacen que la K_s se modifique, ya que a menor porcentaje de materia orgánica, mayor cantidad de gravas y mayor grado de compactación, la conductividad hidráulica disminuye.



Gráfica 22. Conductividad hidráulica saturada (Ks) de las muestras del cerro de Amalucan.

Conductividad hidráulica saturada (m/s)		Interpretación
FAO, 1963	Kutílek & Nielsen, 1994	
$<0.23 \times 10^{-6}$	$<10^{-7}$	Muy baja
$0.23 \times 10^{-6} - 5.8 \times 10^{-6}$	$10^{-7} - 10^{-6}$	Baja
$5.8 \times 10^{-6} - 1.6 \times 10^{-5}$	$10^{-6} - 10^{-5}$	Media
$1.6 \times 10^{-5} - 2.2 \times 10^{-5}$	---	Media-alta
$2.2 \times 10^{-5} - 3.5 \times 10^{-4}$	$10^{-5} - 10^{-4}$	Alta
$>3.5 \times 10^{-4}$	$>10^{-4}$	Excesiva

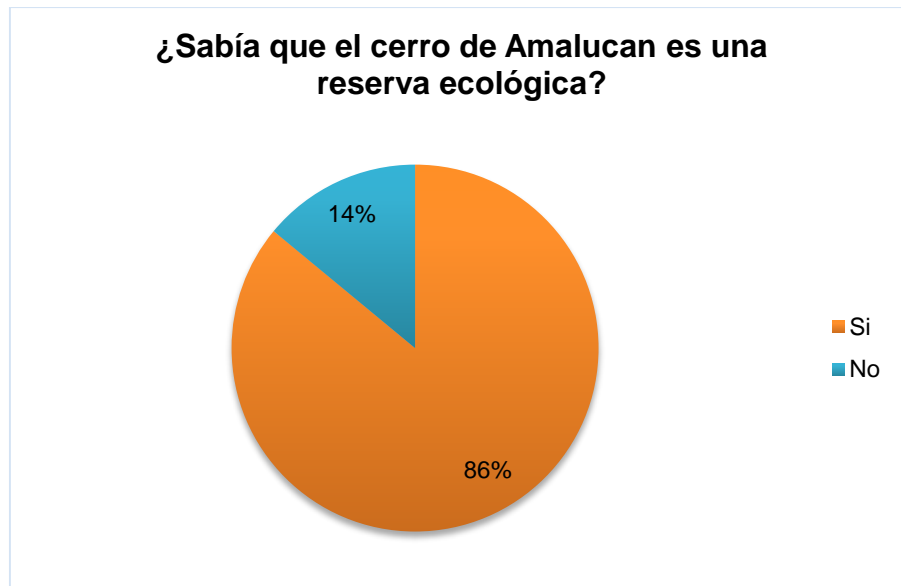
Tabla 19. Interpretación de valores de conductividad Hidráulica saturada.

3.5 PERSPECTIVA SOCIAL

Después de realizar las encuestas, se obtuvieron los siguientes resultados.

El 100% de los encuestados viven cerca del cerro de Amalucan en colonias como Bosques de Amalucan, Bosques de San Sebastián, Joaquín Colombres y el Infonavit Manuel Rivera Anaya.

El 86% sabía que el cerro está considerado como reserva ecológica, mientras que el 14% desconocía el dato (Gráfica 23). Además, 4 personas comentaron que es un sitio arqueológico y debajo del suelo existe una pirámide.



Gráfica 23. Porcentaje de personas que sabían que el cerro de Amalucan es una reserva ecológica.

El 100% de las personas encuestadas realiza actividades en el cerro, ya que las encuestas se llevaron a cabo en el cerro de Amalucan.

El 66% de las personas realizan actividades deportivas; el 26 % realizan actividades deportivas y de esparcimiento; el 6% además de ejercicio también hacen labor social y el 2% restante realizan actividades deportivas, de esparcimiento y labor social. Ver gráfica 24.

Cabe mencionar que dentro de las actividades deportivas que realizan la mayoría de las personas están correr y caminar. El uso de bicicleta, aunque es menos frecuente si se realiza.

Dentro de las actividades de esparcimiento mencionadas en la encuesta se encontraban: relajación, paseo de mascotas y día de campo. Las personas que realizan esta última actividad mencionaron que la realizan una vez al mes y esto representa solo el 6% de los encuestados.

En el rubro de actividades encaminadas a la labor social se encontraban la reforestación, el retiro de basura o limpieza y el cuidado de árboles.

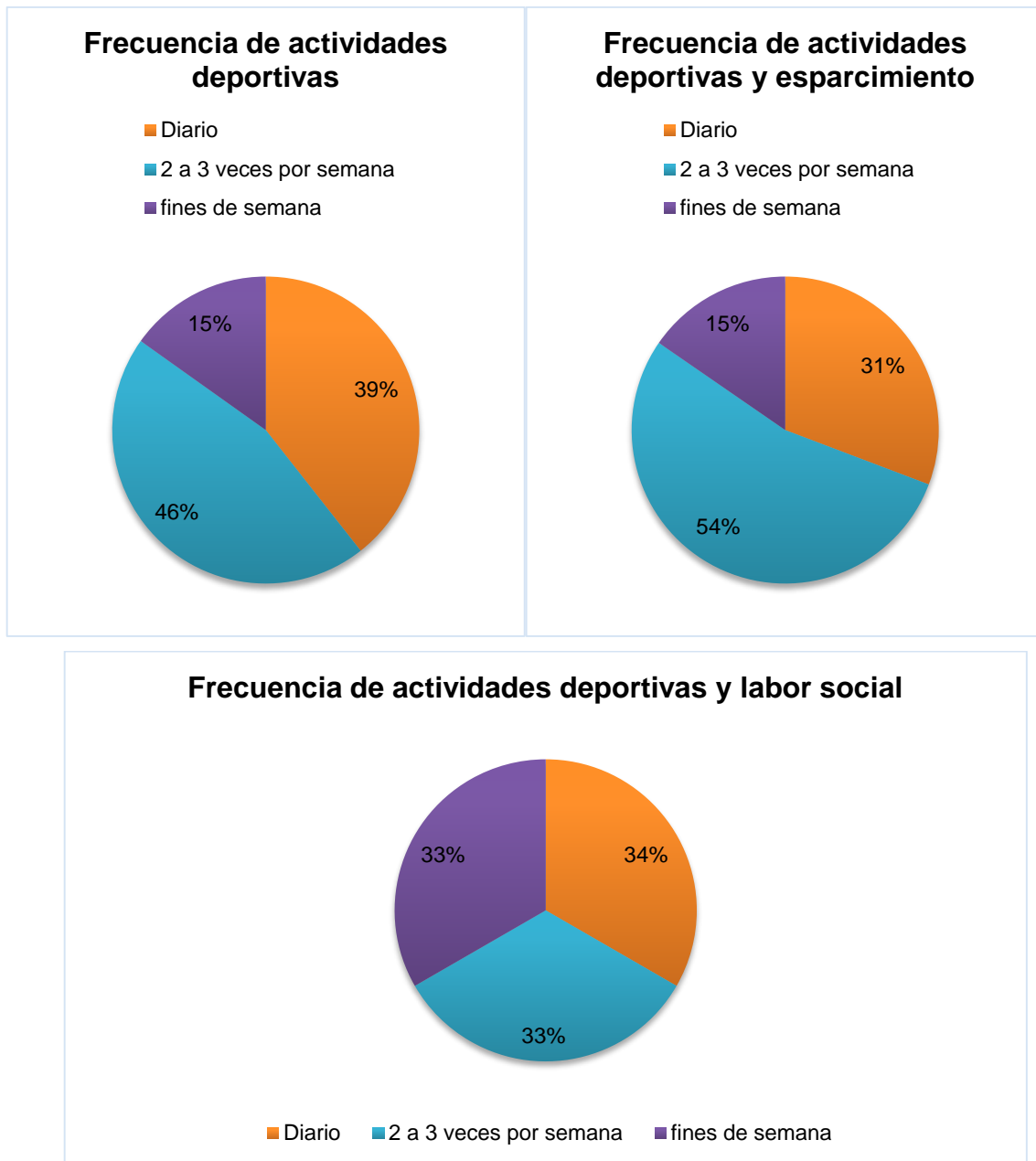
Otra opción contemplada en el aspecto de actividades estaba usar el cerro como vía alterna de transporte, sin embargo, ninguno de los encuestados dijo realizar dicha actividad.

La última opción era especificar si se hacía otra actividad no contemplada. Un encuestado mencionó que hace unos años practicaba equitación en el cerro, pero actualmente ya no la realiza.



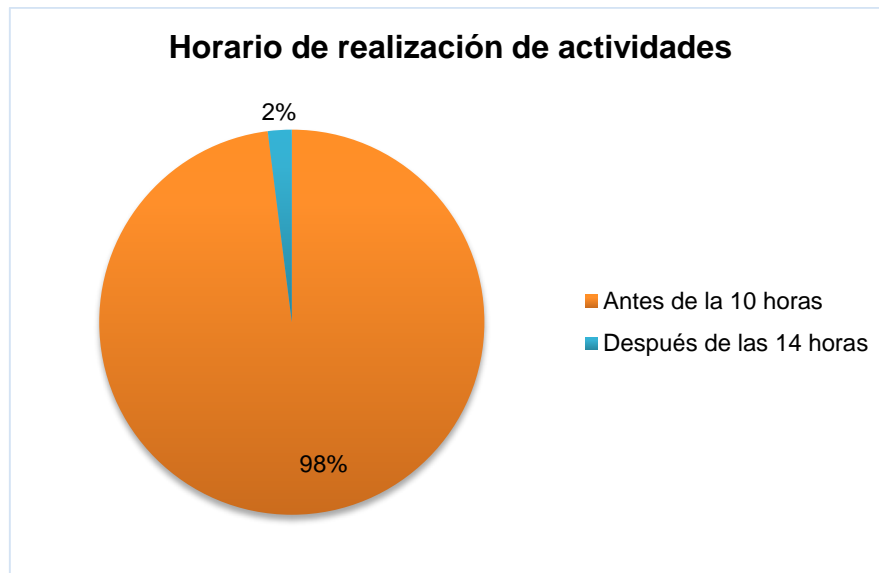
Gráfica 24. Actividades que realizan los encuestados en el cerro.

Respecto a la frecuencia, 46% de las personas que realizan actividades deportivas las llevan a cabo de 2 a 3 veces por semana, el 39% las hace diariamente y el 15% solo las realiza los fines de semana. En cuanto a las personas que realizan actividades deportivas y de esparcimiento, el 54% las realiza de 2 a 3 veces por semana, el 31% diariamente y el 15% los fines de semana. Del porcentaje de personas que realizan actividades deportivas y de labor social, el 33.33% lo hace diariamente, otro 33.33% de 2 a 3 veces por semana y el porcentaje restante los fines de semana. La única persona que realiza 3 actividades (ejercicio, esparcimiento y labor social) las lleva a cabo de 2 a 3 veces por semana. La distribución de porcentajes se observa en la gráfica 25.



Gráfica 25. Arriba a la izquierda, frecuencia de actividades deportivas; arriba a la derecha, frecuencia de actividades deportivas y esparcimiento; abajo, frecuencia de actividades deportivas y labor social.

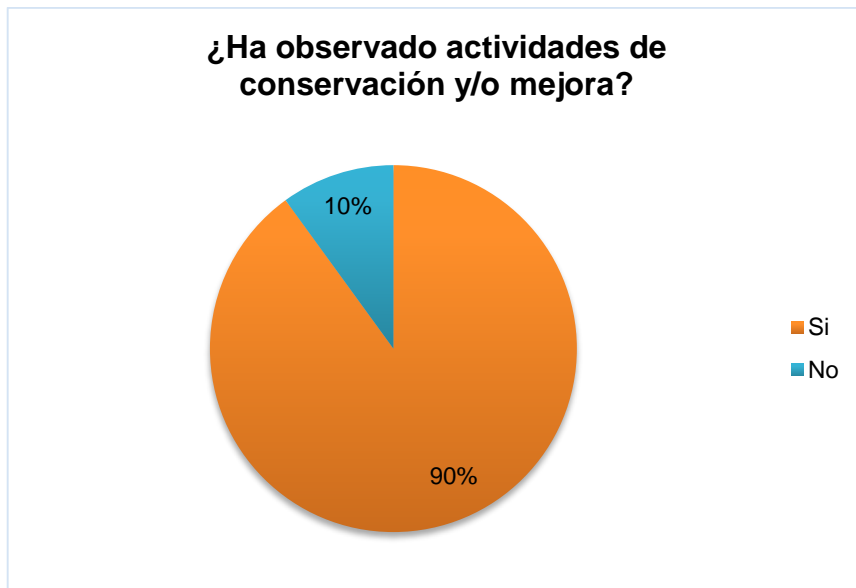
El 98% de los encuestados dijo realizar sus actividades por la mañana, antes de las 10 horas, el 2% restante las realiza por las mañanas algunos días y otros por las tardes, después de las 14 horas. Ver gráfica 26.



Gráfica 26. Horario en el que se realizan actividades en el cerro de Amaluca.

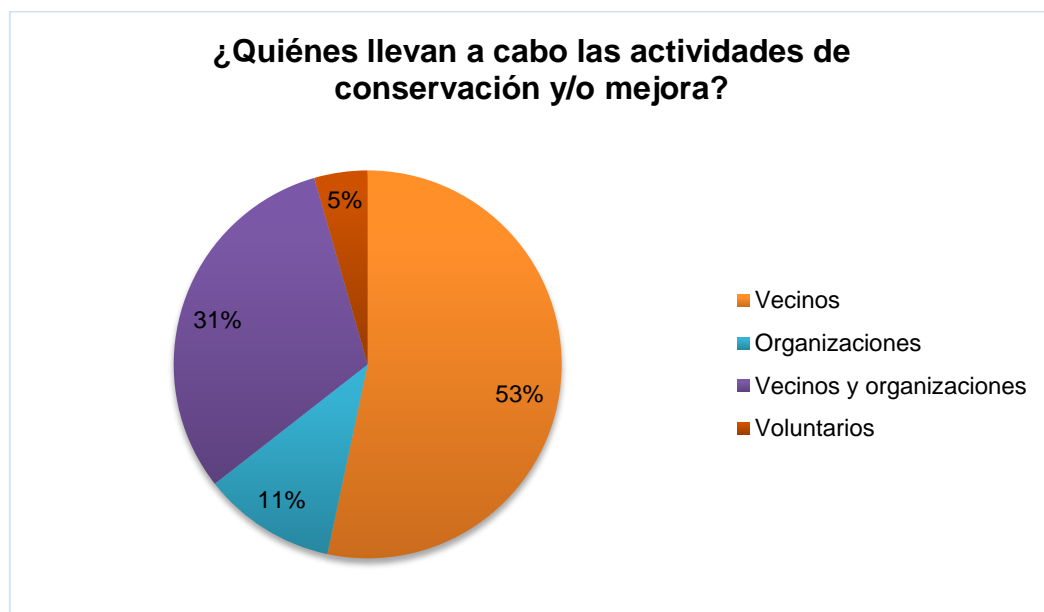
Otra pregunta contemplaba las actividades observadas por las personas. Todos los encuestados coincidieron en que se realizan las más comunes, como ejercicio (caminar, correr, bicicleta) y esparcimiento (relajación, paseo de mascotas, día de campo). También algunos encuestados mencionaron que han observado actividades de labor social como reforestación, cuidado de árboles y limpieza, así como quema de pastizal, pastoreo, vandalismo y la toma del cerro como un camino (vía de transporte) para atravesar de una colonia a otra, en este aspecto, cabe mencionar que se observó a un motociclista pasando por las veredas del cerro.

Otro aspecto relevante para este trabajo son las actividades de conservación y/o mejora. El 90% de las personas considera que si se han reflejado estas actividades, mientras que el 10% percibe de la misma manera al cerro, es decir, que no ha tenido modificaciones en este aspecto. Ver gráfica 27.



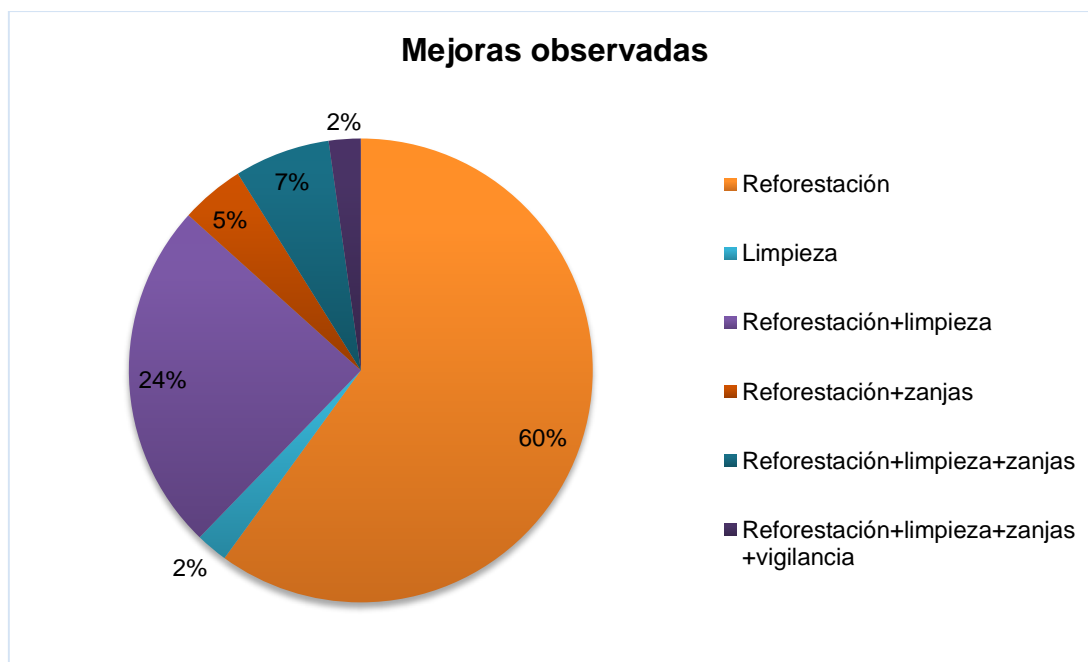
Gráfica 27. Porcentaje de personas que han observado actividades de conservación en el cerro.

De los que consideran que existe alguna mejora en la conservación del cerro, el 53% dice que estas actividades se han realizado por vecinos de la zona, el 11% menciona que las han hecho organizaciones, el 31 % mencionó que por vecinos y organizaciones y el 5% dijo que por voluntarios. Ver gráfica 28.



Gráfica 28. Grupos que realizan las actividades de conservación en el cerro según la opinión de los encuestados.

También se preguntó cuáles son las mejoras que han observado. En la gráfica 29 puede observarse que el 60% mencionó la reforestación, el 2% dijo que la limpieza, el 24% dijo que reforestación y limpieza, el 5% dijo que reforestación y zanjas para controlar el deslave, el 7% dijo que las tres actividades juntas, es decir, reforestación, limpieza y zanjas y el 2% restante comentó que ha observado reforestación, limpieza, zanjas y vigilancia.



Gráfica 29. Mejoras observadas por los encuestados en cuanto a la preservación del cerro de Amalucan.

Las últimas dos preguntas de la encuesta fueron abiertas y consistían en la opinión acerca de la percepción que tienen respecto al cerro y las acciones que propondrían para mejorar las condiciones del cerro en base a sus recursos naturales.

La mayoría de las personas coincidieron en que el cerro de Amalucan es una zona que debe cuidarse para no alterar los recursos con los que cuenta. Consideran al cerro como una de las principales fuentes de producción de oxígeno, ya que es de las pocas áreas de la ciudad que aún tiene cantidad importante de vegetación. También consideran relevante a esta zona porque es el espacio en donde realizan ejercicio al aire libre.

Los encuestados también coincidieron en las actividades que propondrían para mejorar las condiciones del lugar. Las actividades deben estar encaminadas a plantar más árboles y a distribuirlos de una mejor manera, así como cuidar de cada uno de ellos. Una persona que colabora con las actividades de reforestación, mencionó que desea proponer a los vecinos de la zona adoptar un árbol para minimizar las posibilidades de que se marchite.

Por otro lado, se comprobó que se realiza la quema de pastizal con el propósito de evitar incendios en épocas secas y con la creencia de aporte de nutrientes, sin embargo, es una actividad que no está regulada porque no existe ningún plan de manejo por parte de las autoridades.

Otro aspecto que resaltó durante las encuestas es que existe un problema de vandalismo en la zona. Una persona mencionó que el sitio es seguro, pero la mayoría de personas que aportaron comentarios extras, dijeron que después de las catorce horas, el cerro es un sitio inseguro.

CONCLUSIONES

Después de analizar los resultados de los diferentes parámetros físicos, químicos e hidrológicos de las muestras del cerro de Amalucan, compararlos en ciertos casos con referencias de la NOM-021-SEMARNAT-2000, así como establecer cierta relación entre algunos de ellos, se ha llegado a las siguientes conclusiones:

La vegetación mayoritaria del cerro de Amalucan, es decir, los árboles de eucalipto, no son aptos para las condiciones físicas del lugar. A pesar de estar presentes desde hace muchos años, estos árboles pueden no dejar crecer de manera adecuada a las otras especies de árboles y pinos que se están plantando actualmente, debido a que los eucaliptos no son autóctonos del cerro, aunado a esto, los eucaliptos no están aportando materia que sea fácil de descomponer para generar materia orgánica.

Los pinos que se han sembrado, son mucho menor en número que los eucaliptos y están teniendo problemas en algunas zonas, varios están tornándose marchitos (ver anexo fotográfico), debido probablemente a la falta de algunos nutrientes y de agua. A pesar de tener condiciones aparentemente óptimas de conductividad hidráulica y agua disponible,

las especies de eucalipto podrían estar reteniendo el agua y dejando sin este recurso al resto de la vegetación, sumando a este problema los bajos contenidos de calcio, nitrógeno y materia orgánica, principalmente, así como el alto contenido de pedregosidad.

Si bien, hay un buen movimiento de agua dentro de los poros del suelo, la pendiente del terreno, la falta de estabilidad de agregados, y la ausencia de vegetación adecuada hacen de la erosión hídrica uno de los mayores problemas en el cerro de Amalucan.

Cabe mencionar que si no se toman medidas que frenen la erosión hídrica ni se presta atención a la distribución de árboles y cuidado de los mismos, la situación de deterioro del cerro será un hecho. Aclarando que, debido a las acciones que ya se están considerando en el proyecto del parque y si se realiza de acuerdo a lo planeado, existirán avances en cuanto a la reducción de pérdida de vegetación y mejoramiento del suelo. Se espera que en verdad se elabore este proyecto con intención del cuidado del cerro y de sus recursos a largo plazo, así como considerar el hecho de ser una reserva ecológica, ya que de lo contrario se perdería uno de los pocos proveedores de oxígeno para la ciudad de Puebla.

Por otro lado, después de evaluar las actividades antropogénicas y la opinión de los encuestados, la única relación perjudicial encontrada entre las actividades y el suelo, es que en ciertas áreas donde hay más concurrencia de personas se observa un valor de densidad mayor, significando mayor compactación del suelo. Otra relación importante sería la quema de pastizal y el contenido de carbono y nitrógeno para determinar si la actividad está afectando estos parámetros, sin embargo, no es posible hacer una deducción porque no hay estudios anteriores, por lo que esta acción debería estar aceptada y vigilada por las autoridades mediante un plan de manejo que lamentablemente no existe.

En general, las condiciones que producirán que el cerro no pueda conservarse dependen más de la topografía y el origen del suelo que de las actividades que realizan las personas en el lugar, además, la población está de acuerdo en que es una zona muy importante como aporte de oxígeno y como espacio para ejercitarse y mantenerse sanos, por lo que a ellos les interesa conservarlo y como prueba son las actividades de reforestación que se realizan.

Todas estas condiciones hacen que se deseche la hipótesis nula y se acepte la hipótesis alterna, el cerro de Amalucan, catalogado como Reserva Ecológica protegida, no presenta condiciones óptimas de suelo, impidiendo su conservación a largo plazo.

Por último, esta tesis podría servir como una referencia y comparación para estudios posteriores de la zona.

RECOMENDACIONES

Para la conservación del suelo, que es la base para que se mantenga la vegetación en la reserva ecológica, se proponen las siguientes recomendaciones:

En primer lugar, como responsabilidad del municipio, debería existir un plan de manejo para regular las actividades antropogénicas y llevar a cabo acciones en pro de la reforestación bien distribuida, con especies aptas para el tipo de suelo y con la tala paulatina de eucaliptos, así como el cuidado continuo de los árboles y pinos ya presentes, ya que toda esta población ayudará a retener agua y evitar más desgaste del suelo por erosión. También la agregación de compostas o abono en áreas donde se planten nuevos árboles, debería llevarse a cabo para un aporte de nutrientes.

Según las condiciones de la zona geográfica en la que se encuentra el cerro de Amalucan, la vegetación apta serían pinos y encinos, que se distribuyen en casi todas las montañas y sierras del estado, entre 1 000 a 3 000 msnm, el clima es templado subhúmedo con lluvias en verano, con temperaturas de 16 a 20°C, las precipitaciones fluctúan entre 700 a 1 500 mm. Se desarrolla sobre diferentes tipos de roca: ígneas, sedimentarias y metamórficas, los suelos son delgados y poco desarrollados, principalmente de tipo Litosol, Regosol, Cambisol, además de suelos derivados de cenizas volcánicas, como Andosol (INEGI, 2000).

Como ya se mencionó, el clima de la zona es templado subhúmedo con lluvias en verano, temperatura media anual es de 17.3°C y lluvia anual de 973.9 mm en promedio y un suelo cambisol, por lo que se cumplen las condiciones.

Las combinaciones de las especies más importantes de este tipo de bosque son: *Pinus montezumae*, *P. pseudostrobus*, *P. lawsoni*, *P. leiophylla*, *P. michoacana*, *P. teocote*, y en

el caso de los encinos son: *Quercus oleoides*, *Q. crassipes*, *Q. castanea*, *Q. crassifolia*, *Q. hartwegii* y *Q. mexicana* (INAFED, 2016).

Por otro lado, sumando a la vegetación, las barreras o zanjas también tendrían que implementarse para controlar los procesos de erosión hídrica.

Se sugiere que las personas tengan rutas específicas para realizar ejercicio y eviten hacer veredas en cualquier zona, así se evitaría que existan problemas de compactación. Evitar el paso de personas en motocicletas también es una medida que debe tomarse en cuenta.

Como ya se mencionó, esta tesis no está ligada al proyecto del parque, sin embargo, ciertas acciones sí se contemplan en el plan a realizar, por lo que se comprueba que las condiciones del cerro no son las óptimas y se pretende mejorarlas, aunque también es incierto el impacto que pudiera generar el proyecto a largo plazo en cuanto al recurso suelo debido a la influencia antropogénica que seguramente aumentará.

De manera global, se recomienda hacer buen uso de esta reserva ecológica y concientizar a los niños y futuras generaciones para cuidar el suelo, que es el sustento de las plantas y en suma, a todos los recursos naturales para mantener vivo uno de los pocos pulmones de la ciudad de Puebla.

BIBLIOGRAFÍA

- Agricultureros. (14 de Febrero de 2017). *Valores de referencia de un análisis de suelo*. Recuperado el 20 de Octubre de 2017, de <http://agricultureros.com/valores-de-referencia-de-un-analisis-de-suelo/>
- AgroLab. (2011). *Guía de referencia para la interpretación de análisis de suelos*. Análisis Técnicos, S.A. de C.V.
- Andrés Cardona, W., Bolaños Benavides, M., & Chavarriaga Montoya, W. (2016). Efecto de fertilizantes químicos y orgánicos sobre la agregación de un suelo cultivado con *Musa acuminata* AA. *Acta agronómica*, 62(2).
- Área de edafología y química agrícola. (13 de Abril de 2005). *Propiedades del Suelo*. Obtenido de <https://www.eweb.unex.es/eweb/edafo/ECAP/ECAL5PFPorosidad.htm>
- Arriaga, L., Espinoza, J., Aguilar, C., Martínez, E., Gómez, L., & Loa, E. (2000). *ACERCA DE LAS RTP*. Obtenido de CONABIO: <http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/regionalizacion/doctos/Tacerca.html>
- Arriaga, L., Espinoza, J., Aguilar, C., Martínez, E., Gómez, L., & Loa, E. (26 de Junio de 2017). *REGIONES TERRESTRES PRIORITARIAS DE MÉXICO*. Obtenido de CONABIO: <http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/regionalizacion/doctos/terrestres.html>
- Baver, L., & Gardner, W. (1972). *Soil Physics*. Nueva York: L. Wiley & Sons.
- Beltrán Martínez, R. (2009). *Diseño geotécnico y estructural de una cimentación en arcilla expansiva*. México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Biodiversidad, C. N. (05 de Diciembre de 2013). *Bosques Templados*. (CONABIO, Editor) Obtenido de <http://www.biodiversidad.gob.mx/ecosistemas/bosqueTemplado.html>
- Bustamante, H. (1986). Potencial del agua del suelo. *Facultad Nacional de Agronomía*, 39(2).

- C. Brady, N., & R. Weil, R. (2000). *Elements of the Nature and Properties of Soils* (12 ed.). New Jersey: Prentice-Hall.
- Calderón Sáenz, F. (21 de Febrero de 2001). *La estabilidad estructural del suelo*. (C. S.A., Editor) Obtenido de http://www.drcalderonlabs.com/Publicaciones/Estabilidad_Estructural_del_Suelo.htm
- Casanova, O. (1999). *Acidez y encalado en suelos*. Montevideo: Facultad de Agronomía.
- CONAGUA. (s.f.). *Resúmenes Mensuales de Temperaturas y Lluvia*. Obtenido de <http://smn.cna.gob.mx/es/climatologia/temperaturas-y-lluvias/resumenes-mensuales-de-temperaturas-y-lluvias>
- CONANP. (2001). *Áreas naturales protegidas de México con decretos estatales*. SEMARNAT, México.
- Costa Martín, J., & Ocete Soto, C. (1999). *Universidad de Granada*. Obtenido de Nitratos en el suelo: <http://www.ugr.es/~cjl/Nitrogeno%20en%20suelos.pdf>
- D. Chapman, H., & F. Pratt, P. (1981). *Métodos de análisis para suelos, plantas y aguas*. México: Trillas S.A.
- Daza Torres, M., Hernández Florez, F., & Alba Triana, F. (05 de Septiembre de 2013). Efecto del Uso del Suelo en la Capacidad de Almacenamiento Hídrico en el Páramo de Sumapaz - Colombia.
- DGI-CLEU. (20 de Febrero de 2015). *Victimización del cerro de Amalucan y del Parque ecológico*.
- Donado Garzón, L., & Colmenares Montañez, J. (Mayo de 2004). *Modelo de Conductividad Hidráulica en Suelos*. Bogotá, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- FAO. (8 de Marzo de 2001). *¿Los eucaliptos son ecológicamente nocivos?* Recuperado el 15 de Octubre de 2017, de La genética y los bosques del futuro: <http://www.fao.org/docrep/r7750s/r7750s03.htm>

- FAO. (2005). Conservación de los recursos naturales para una Agricultura sostenible. *Materia orgánica y actividad biológica* .
- FAO. (2005). Optimización de la humedad del suelo para la producción vegetal. *El significado de la porosidad del suelo*. (F. Shaxson, & R. Barber, Edits.) Roma.
- FAO. (2009). Guía para la descripción de suelos. *Cuarta*. (R. V. Rojas, Trad.) Roma, Italia.
- FAO. (01 de Abril de 2014). *Portal de Suelos de la FAO*. Obtenido de ¿Qué es el Suelo?: <http://www.fao.org/soils-portal/about/definiciones/es/>
- FAO. (2015). *Los suelos sanos son la base para la producción de alimentos saludables*. Obtenido de <http://www.fao.org/soils-2015/news/news-detail/es/c/277721/>
- Fdez, C. D. (s.f.). *CARBONATOS EN SUELOS*. (F. d. Dpto. Edafología y Química Agrícola, Editor) Recuperado el 11 de Junio de 2016, de Programa sobre el proceso de acumulación y lavado de los carbonatos y de los rasgos resultantes de su actuación en los suelos.: <http://edafologia.ugr.es/carbonat/proced.htm#anchor411588>
- Fernández Linares, L., Rojas Avelizapa, N., Roldán Carrillo, T., Ramírez Islas, M., Zegarra Martínez, H., Uribe Hernández, R., . . . Arce Ortega, J. (2006). *Manual de técnicas de análisis de suelos aplicadas a la remediación de sitios contaminados*. México: SEMARNAT, IMP, INE.
- FERTILAB. (2014). *Fertilab*. Recuperado el 11 de Junio de 2016, de <http://www.fertilab.com.mx/Sitio/Vista/El-Analisis-de-Extracto-Saturado.php>
- Flores Delgadillo, L., & Alcalá Martínez, J. (2010). *Manual de Procedimientos Analíticos*. México: UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO, Instituto de Geología, Departamento de edafología.
- Freeman, A. (Mayo de 2014). Investigating Sociopolitical Complexity Through the Presentation of Food: an Analysis of Middle to Late Formative Ceramics from Amalucan, Puebla, Mexico. Wisconsin, Estados Unidos: University of Wisconsin-Milwaukee.

- Garrido Valero, M. S. (1993). *Interpretación de Análisis de Suelo*. Madrid: Ministerio de agricultura, Pesca y Alimentación.
- Geissert Kientz, D., Ramírez Salazar, M., & Meza Pérez, E. (2000). Propiedades físicas y químicas de un suelo volcánico bajo bosque y cultivo en Veracruz, México. 2(1). Xalapa, México: Foresta Veracruzana.
- GeoNode. (20 de Marzo de 2017). *Aparato volcánico*. Obtenido de http://geothoponode.igg.cnr.it/layers/geonode%3Ainfg_vol_gemex#more
- Hans W., F. (1975). *Química de Suelos con énfasis en suelos de América Latina*. Turrialba, Costa Rica: IICA.
- Heine, K. (2003). Paleopedological Evidence of Human-induced Environmental Change in the Puebla – Tlaxcala Area (Mexico) during the last 3,500 Years. *Revista Mexicana De Ciencias Geológicas*(3).
- Hillel, D. (1998). *Environmental Soil Physics*. Estados Unidos de América: Academic Press.
- Honora Pinto, R. (2000). *Manual de Edafología* (Cuarta ed.). México: ALFAOMEGA GRUPO EDITOR S.A. DE C.V.
- INAFED. (20 de Enero de 2016). *Enciclopedia de Los Municipios y Delegaciones de México*. Obtenido de <http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM21puebla/mediofisico.html>
- INEGI. (1982). Carta edafológica zona E14B43. Escala 1:50000.
- INEGI. (1983). Carta de uso de suelo y vegetación zona E14B43. Escala 1:50000.
- INEGI. (1985). Carta geológica zona E14B43. Escala 1:50000.
- INEGI. (1995). Carta topográfica zona E14B43. Escala 1:50000.
- INEGI. (1998). *Diccionario de datos edafológicos*. México.
- INEGI. (2000). *Síntesis geográfica del estado de Puebla*.

- INEGI. (Marzo de 2011). *Población rural y urbana*. Obtenido de http://cuentame.inegi.org.mx/poblacion/rur_urb.aspx?tema=P
- Infoagro Systems S.L. (16 de Febrero de 2010). *Análisis de hojas, suelos y aguas para el diagnóstico nutricional*. Obtenido de http://www.infoagro.com/citricos/diagnostico_nutricional_citricos2.htm
- Ingeniería rural. (2008). *Relación agua-suelo-planta*. España: Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Agrícola.
- J. Schaetzl, R., & Anderson, S. (2005). *Soils: genesis and geomorphology*. Nueva York, Estados Unidos de América: Cambridge University Press.
- L. Rucks, F. García, A. Kaplán, J. Ponce de León, & M. Hill. (2004). *Propiedades Físicas del suelo*. Montevideo: Facultad de Agronomía.
- Lobo L., D., & Pulido M., M. (2006). Métodos e índices para evaluar la estabilidad estructural de los suelos. *Venesuelos*, 14(1).
- M. L., J. (1976). *Análisis Químico de Suelos* (Tercera ed.). (J. Beltrán Martínez, Trad.) Barcelona, España: Ediciones Omega S. A.
- M. Thompson, L., & R. Troeh, F. (1988). *Los suelos y su fertilidad*. Barcelona: Reverté.
- Manzanilla, L., & López Luján, I. (2000). *Historia antigua de México*. México: INAH.
- Martínez H., E., Fuentes E., J., & Acevedo H., E. (2008). *Carbono orgánico y propiedades del suelo*. (F. d. Universidad de Chile, Ed.) Santiago de Chile.
- Molina, E. (26 de Febrero de 2015). *Análisis de Suelo y su Interpretación*. Costa Rica: AMINO GROW INTERNATIONAL.
- NOM-021-SEMARNAT-2000. (31 de Diciembre de 2002). *Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, muestreo y análisis*. México: DIARIO OFICIAL DE LA FEDERACIÓN.
- O. Buckman, H., & C. Brady, N. (1982). *Naturaleza y propiedades de los suelos*. (B. R. Salord, Trad.) México: UTEHA.

- Oliva Escobar, D. P. (Diciembre de 2009). Determinación de la acidez intercambiable a partir del pH para la estimación de la capacidad de intercambio catiónico en suelos de la cuenca del Pacífico. Zamorano, Honduras.
- Pérez Ramírez, C., Zizumbo, L., & González Vera, M. (Junio de 2009). Impacto ambiental del turismo en áreas naturales protegidas; procedimiento metodológico para el análisis en el Parque Estatal El Ocotil, México. *El Periplo Sustentable*.(16).
- Porta Casallenas, J., Acevedo Reguerín, M., & Roquero de Laburu, C. (2003). *Edafología para la agricultura y el medio ambiente* (Tercera ed.). México: Ediciones Mundi-Prensa.
- Puebla, A. d. (s.f.). Carta Urbana. Recuperado el 16 de Octubre de 2017, de <https://implanpuebla.maps.arcgis.com/apps/webappviewer/index.html?id=587f9995a7244ce9a697c53d101a6b11>
- R. Earl, S. (1970). *Manual de Evaluación de Suelos*. (A. Blackaller Valdés, Trad.) México: UTEHA.
- Saxton, K. E., & Rawls, W. (2006). *Washington, Estados Unidos de América Patente nº 6.02.74*.
- SDRSOT. (2017). *ECO PUE*. Obtenido de Gobierno del Estado de Puebla: http://memoriastransparencia.puebla.gob.mx/index.php?option=com_k2&view=item&id=576:econavidad&Itemid=5220
- SENADO DE LA REPÚBLICA. (29 de Mayo de 2013). *INICIATIVAS DE CIUDADANOS LEGISLADORES*. Obtenido de <http://www.senado.gob.mx/index.php?ver=sp&mn=2&sm=2&id=41383>
- Smart Fertilizer Management. (02 de Febrero de 2013). *El Magnesio en en suelo y plantas*. Obtenido de <http://www.smart-fertilizer.com/es/articles/magnesium>
- SSSA. (1986). *Methods of Soil Analysis: Part 1—Physical and Mineralogical Methods* (Vol. 1). (A. Klute, Ed.) Madison, Estados Unidos de América: SSSA Book Ser. 5.1. SSSA, ASA.

- SSSA. (1996). *Methods of Soil Analysis Part 3—Chemical Methods* (Vol. 3). (D. Sparks, A. Page, P. Helmke, & R. Loeppert, Edits.) Madison, Estados Unidos de America: SSSA Book Ser. 5.3. SSSA.
- Toby Evans, S., & L. Webster, D. (2001). *Archaeology of Ancient Mexico and Central America*. Nueva York: Garland Publishing Inc.
- USDA. (2014). *Kellogg Soil Survey Laboratory Methods Manual*. Lincoln, Nebraska, USA.
- USDA. (2014). Soil Survey Field and Laboratory Methods Manual. *Soil Survey Investigations Report No. 51(Versión 2.0)*.
- Walter Osorio, N. (s.f.). Potenciales del agua en el suelo. Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- WRB, I. G. (2007). *Base Referencial Mundial del Recurso Suelo*. Roma: FAO.
- Z. Castellanos, J. (2016). *Guía para la interpretación del análisis de suelo y agua*. Celaya: INTAGRI.

ANEXO FOTOGRÁFICO



Figura 82. Pinos plantados a escasos centímetros.



Figura 83. Vegetación joven en proceso de marchitamiento.

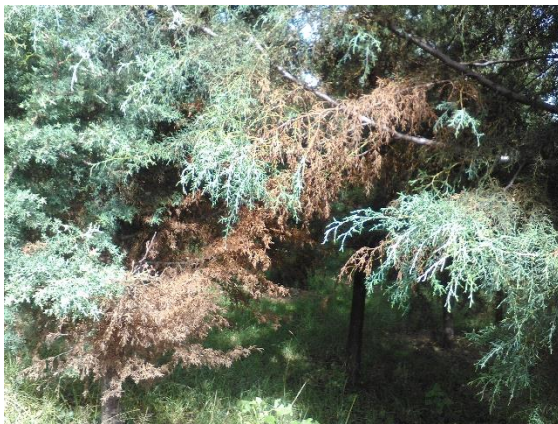


Figura 84. Marchitez de pino.



Figura 85. Vegetación en proceso de marchitez en una zona importante.

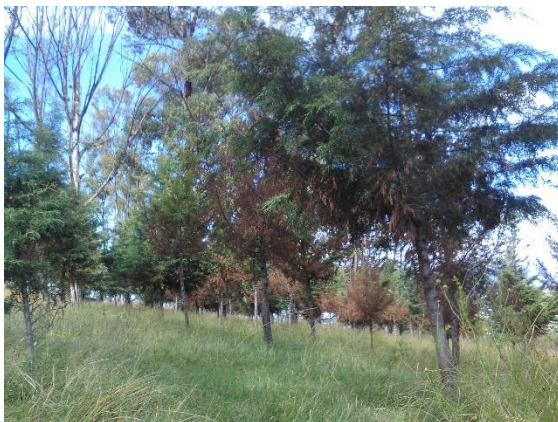


Figura 86. Presencia mayoritaria de pinos con indicios de marchitamiento.



Figura 87. Vegetación mayoritaria de eucaliptos.



Figura 88. Vista del cerro desde la Av. Xonacatepec.



Figura 89. Apreciación de la vegetación del cerro, eucaliptos en su mayoría.



Figura 90. Restos de cenizas debido a actividades antropogénicas (fogatas).



Figura 91. Caminos amplios y escasa vegetación en la zona este del cerro.



Figura 92. Uno de los camino principales para subir al cerro.



Figura 93. Zanjas realizadas para controlar la erosión.

