



**COLEGIO DE POSTGRADUADOS**

**INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS**

**CAMPUS MONTECILLO**

**POSTGRADO EN EDAFOLOGÍA**

**EFFECTO DE LA MATERIA ORGÁNICA  
SOBRE LA COMPACTACIÓN DE  
SUELOS AGRÍCOLAS**

MELISSA ELENA ROMÁN OLAZARÁN

**T E S I S**  
PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL  
PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRA EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, ESTADO DE MÉXICO

2020

La presente tesis titulada: EFFECTO DE LA MATERIA ORGÁNICA SOBRE LA COMPACTACIÓN DE SUELOS AGRÍCOLAS realizada por la alumna: MELISSA ELENA ROMÁN OLAZARÁN bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRA EN CIENCIAS  
EDAFOLOGÍA

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO

  
\_\_\_\_\_  
DR. ARTURO GALVIS SPINOLA

Escriba el texto aquí

ASESOR

  
\_\_\_\_\_  
DR. JUAN JOSÉ ALMARAZ SUÁREZ

ASESORA

  
\_\_\_\_\_  
DRA. TERESA MARCELA HERNÁNDEZ MENDOZA

# EFFECTO DE LA MATERIA ORGÁNICA SOBRE LA COMPACTACIÓN DE SUELOS AGRÍCOLAS

Melissa Elena Román Olazarán, M.C.  
Colegio de Postgraduados. 2020

## RESUMEN

La compactación del suelo es una de las formas de degradación del medio edáfico que repercute negativamente sobre la productividad agrícola, lo cual puede ser debido a las condiciones ambientales que se exacerban por cierto tipo de prácticas de manejo. Por lo anterior, esta investigación tuvo como propósito establecer un diagnóstico de las condiciones físicas y químicas edáficas en una zona agrícola irrigada, teniendo como estudio de caso la región irrigada Centro-Golfo, Veracruz (aproximadamente 11 mil hectáreas compactas), para generar los indicadores de las propiedades y características edáficas, que permitan dilucidar el efecto de las prácticas agrícolas sobre la compactación del suelo. Para ello, se colectaron 140 muestras (una submuestra cada dos hectáreas y una muestra compuesta en cinco hectáreas con condiciones razonablemente homogéneas), distribuidas de manera razonablemente homogénea en toda la región. Con base en la NOM-021-RECNAT-2000, se analizó conductividad eléctrica (pasta de saturación), densidad aparente, materia orgánica, bases intercambiables, textura, constantes hídricas (capacidad de campo, marchitez permanente) y se generaron ocho indicadores o estimadores ( $I_{TP}$ = proporción del tamaño de partícula;  $E_{ac}$ = estimador de la fracción arcillosa;  $E_{Dap}$ = estimador de  $D_{ap}$ ;  $I_{Dap}$ = índice de  $D_{ap}$ ;  $A_{Dap}$ = agrupación de  $D_{ap}$ ;  $C_{Ce}$ = estimación de capacidad de campo;  $P_{MPE}$ = estimación de marchitez permanente;  $H_{Ae}$ = estimación de humedad aprovechable. Se planteó como hipótesis que la densidad aparente no tiene una relación significativa con las propiedades edáficas, lo cual se verificó en este estudio, razón por la cual no es viable emplearla por sí misma como indicador de las condiciones productivas de un suelo. La segunda hipótesis, se propuso que las constantes hídricas se asocian directamente con la fracción mineral y su relación cuantitativa constituye un buen indicador de la modificación de la capacidad del suelo para almacenar agua.

**Palabras clave:** estructura del suelo, espacio poroso, humedad del suelo

# EFFECT OF ORGANIC MATTER ON AGRICULTURAL SOIL COMPACTION

Melissa Elena Román Olazarán, M.C.  
Colegio de Postgraduados. 2020

## ABSTRACT

Soil compaction is one of the forms of degradation of the soil environment that has a negative impact on agricultural productivity, which may be due to environmental conditions that are exacerbated by certain types of management practices. Therefore, this research aimed to establish a diagnosis of the edaphic physical and chemical conditions in an irrigated agricultural area, taking as a case study the irrigated Central-Gulf region, Veracruz (approximately 11 thousand compact hectares), to generate the indicators of the edaphic properties and characteristics, which allow to elucidate the effect of agricultural practices on soil compaction. For this, 140 samples were collected (a subsample every two hectares and a composite sample in five hectares with reasonably homogeneous conditions), distributed in a reasonably homogeneous way throughout the region. Based on NOM-021-RECNAT-2000, electrical conductivity (saturation paste), apparent density, organic matter, interchangeable bases, texture, water constants (field capacity, permanent wilting) were analyzed and eight indicators or estimators were generated. (ITP = particle size ratio; Eac = clay fraction estimator; EDap = Dap estimator; IDap = Dap index; ADap = Dap grouping; CCe = field capacity estimate; PMPe = permanent wilting estimate; HAe = usable moisture estimate. It was hypothesized that the apparent density does not have a significant relationship with the edaphic properties, which was verified in this study, which is why it is not feasible to use it by itself as an indicator of the productive conditions. The second hypothesis was proposed that the hydric constants are directly associated with the mineral fraction and their quantitative relationship constitutes a good indicator of the modification of the ability of the soil to store water.

**Keywords:** soil structure, pore space, soil moisture

## **AGRADECIMIENTOS**

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por brindarme el apoyo económico para realizar mis estudios de postgrado.

Al Colegio de Postgraduados, por darme la oportunidad de estudiar y adquirir las herramientas que me permitirían crecer profesionalmente.

Al Dr. Arturo Galvis Spinola por los consejos y enseñanzas que me brindó durante mis estudios, y de su disposición para llevar a cabo este trabajo.

A los Doctores Juan José Almaraz Suárez y Teresa Marcela Hernández Mendoza, por su tiempo y disposición para el desarrollo del presente trabajo.

A todas las personas que fueron un pilar importante en mi desarrollo durante mi estancia en el Colegio de Postgraduados.

A mi familia por estar ahí siempre.

## CONTENIDO

RESUMEN .....	iii
ABSTRACT .....	iv
AGRADECIMIENTOS .....	v
LISTA DE FIGURAS .....	viii
LISTA DE CUADROS .....	xi
I INTRODUCCIÓN .....	1
II REVISIÓN DE LITERATURA.....	3
2.1 El suelo como reservorio de agua para los cultivos .....	3
2.1.1 Conceptos generales del suelo.....	3
2.1.2 Componentes de la fase sólida del suelo y su vinculación con la compactación del medio edáfico.....	7
2.2 La materia orgánica y su influencia sobre la compactación del suelo y su capacidad de almacenamiento de agua.....	13
2.2.1 Características de la solución del suelo.....	13
2.2.2 Potencial hídrico del suelo .....	17
2.2.3 Influencia de la materia orgánica sobre la compactación del suelo .....	22
III OBJETIVOS E HIPÓTESIS.....	30
3.1 Objetivos .....	30
3.2 Hipótesis .....	30
IV MATERIALES Y MÉTODOS.....	31
4.1 Área de estudio .....	31
4.2 Condiciones climáticas en el área de estudio .....	34
4.3 Procedimientos para analizar el suelo del área de estudio .....	37
4.3.1 Colecta y procesamiento de las muestras de suelo.....	37
4.3.2 Análisis de las condiciones físicas y químicas edáficas de la zona de estudio .....	38
4.3.3 Generación de los indicadores y reconversión de variables .....	43
4.4 Análisis estadísticos.....	48
V RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	50

5.1 Influencia de las condiciones físicas y químicas de los suelos, sobre la compactación del medio edáfico .....	50
5.2 La humedad aprovechable como indicador de la compactación de los suelos agrícolas .....	62
VI CONCLUSIONES .....	74
VII BIBLIOGRAFÍA .....	75

## LISTA DE FIGURAS

Figura 4.1. Relación de la variación total mensual de la evaporación respecto a la precipitación pluvial en el área agrícola de la región Centro Golfo, Veracruz. ....	34
Figura 4.2. Distribución del porcentaje de días con granizo al mes en el área agrícola de la región Centro Golfo, Veracruz. ....	35
Figura 4.3. Variación de la temperatura promedio mensual mínima y máxima que se reporta en las estaciones climáticas ubicadas en el área agrícola de la región Centro Golfo, Veracruz. ....	36
Figura 5.1. Tendencia entre los grupos texturales del suelo en los suelos colectados en el área agrícola de la región Centro Golfo, Veracruz. ....	51
Figura 5.2. Distribución de frecuencia por tamaño de partícula en los suelos colectados en el área agrícola de la región Centro Golfo, Veracruz. ....	52
Figura 5.3. Contenido de arcilla detectada en las muestras de suelo colectadas en el área agrícola de la región Centro Golfo, Veracruz. ....	53
Figura 5.4. Variación de la suma de bases intercambiables en las muestras de suelo que se colectaron en el área agrícola de la región Centro Golfo, Veracruz. ....	54
Figura 5.5. Tendencia entre arcilla y bases intercambiables en las muestras de suelo colectadas en el área agrícola de la región Centro Golfo, Veracruz. ....	55
Figura 5.6. Contenido de materia orgánica en las muestras de suelo que se colectaron en el área agrícola de la región Centro Golfo, Veracruz. La línea roja representa el valor promedio. ....	57

Figura 5.7. Densidad aparente detectada en las muestras de suelo colectadas en el área agrícola de la región Centro Golfo, Veracruz. .....	58
Figura 5.8. Conductividad eléctrica (medido en el extracto de la pasta de saturación) en las muestras de suelo que se colectaron en el área agrícola de la región Centro Golfo, Veracruz. La línea horizontal representa el valor por encima del cual se esperarían problemas en cultivos sensibles a la presencia de sales solubles.....	60
Figura 5.9. Constantes hídricas en las muestras de suelo que se colectaron en el área agrícola de la región Centro Golfo, Veracruz. .....	61
Figura 5.10. Tendencia entre los grupos texturales del suelo (TEXT) y el indicador de la proporción del tamaño de partícula (ITP), en los suelos colectados en el área agrícola de la región Centro Golfo, Veracruz. TEXT: 1=franco-arenosa; 2=franco-arcillo-arenosa; 3=franca; 4=franco-arcillosa; 5=arcillosa .....	63
Figura 5.11. La generación del indicador de la fracción arcillosa (EAC) es producto de la relación cuantitativa entre la concentración de arcilla (AC) y el indicador de la proporción del tamaño de partícula (ITP).....	65
Figura 5.12. Tendencia entre la capacidad de campo (CC) medida en el laboratorio y el indicador de la proporción del tamaño de partícula (ITP) en las muestras colectadas en el área de estudio .....	66
Figura 5.13. Tendencia entre el punto de marchitez permanente (PMP) medido en el laboratorio y el indicador de la proporción del tamaño de partícula (ITP) en las muestras colectadas en el área de estudio .....	66

Figura 5.14. Cuantificación de la tendencia entre el estimador de la densidad aparente (EDap) y el indicador de la proporción del tamaño de partícula (ITP), donde EDap se consideró el valor de la densidad aparente de un suelo si no hubiese compactación, a una condición textural específica. ....	67
Figura 5.15. Relación entre el valor de la densidad aparente medida en las muestras colectadas en el área de estudio (DAP) y su estimador (EDap). El segmento punteado indica la línea 1:1 de la tendencia entre ambas variables. ....	68
Figura 5.16. Indicador de la densidad aparente (IDap) en las distintas muestras de suelo colectadas en la zona de estudio, el cual se asoció con el tamaño del espacio poroso y, por ende, si hay o no una posible compactación. ....	69

## LISTA DE CUADROS

Cuadro 4.1. Cultivos producidos en la zona donde se ubicó el área de estudio, la cual corresponde a la región Centro Golfo, Veracruz (Fuente: SIAP, 2019.) .....	31
Cuadro 4.2. Metodología indicada en la Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000 por cada variable en estudio. ....	39
Cuadro 4.3. Índice que se empleó para identificar cada uno de los grupos texturales detectados en las muestras analizadas colectadas en la región Centro Golfo, Veracruz.....	43
Cuadro 4.4. Código asignado por densidad aparente (ADap) a las muestras que se analizaron de la región Centro Golfo, Veracruz, de acuerdo con el indicador de su densidad aparente (IDap).....	46
Cuadro 5.1. Valores estadísticos (VE) de las variables analizadas a las 140 muestras de suelo colectadas en el área de estudio. ....	50
Cuadro 5.2. Distribución de frecuencia de la suma de bases intercambiables en las 140 muestras de suelo colectadas en el área de estudio. ....	55
Cuadro 5.3. Distribución de frecuencia (DF) de las constantes hídricas (capacidad de campo, CC y punto de marchitez permanente, PMP) de las muestras de suelo colectadas en el área de estudio.....	62
Cuadro 5.4. Contraste de los valores del índice proporcional de la textura del suelo (ITP) por grupo textural, de las muestras colectadas en la zona de estudio.....	64
Cuadro 5.5. Agrupación de las variables analizadas en las muestras colectadas en el área de estudio, con base en la codificación generada para la clasificación de la densidad aparente (ADap).....	70

Cuadro 5.6. Coeficiente de correlación (r) entre el indicador del grupo textural (TEXT) y las variables consideradas (X) para evaluar las condiciones edáficas en el área de estudio .....	71
Cuadro 5.7. Análisis de los cambios en las variables evaluadas (X) por efecto del grupo textural (TEXT), de acuerdo a su correlación (r) generada al compararlas entre sí [TEXT = f (X)] .....	72

## I INTRODUCCIÓN

Los suelos son alterados por la acción de diversas variables de distinto origen, ya sea por causas naturales o por las prácticas del manejo agrícola. Entre estas, la compactación del medio edáfico es una de las más recurrentes, cuya repercusión negativa sobre la productividad agrícola es función del grado de disminución del espacio poroso, sin importar el cultivo que se trate, causando pérdidas económicas importantes y en la producción de alimentos. El grado de vulnerabilidad de los suelos difiere fundamentalmente por su distribución del tamaño de partículas, siendo los más susceptibles en los que abunda la fracción fina y esto empeora cuando las técnicas empleadas no son las apropiadas. Entre estas, destaca el uso de ciertos implementos de labranza, paso de maquinaria pesada, laboreo excesivo, sobre pastoreo, escasez o ausencia total de aplicación de materiales orgánicos, riego por gravedad, donde la práctica habitual sea la inundación de las parcelas, entre otros.

Los fluidos del suelo (aire y agua) circulan a través del espacio poroso, por lo tanto, si este se reduce, también lo hará la tasa con la que fluye la fase gaseosa y líquida del medio edáfico, provocando la reducción del oxígeno libre, el contenido de agua, anegamientos continuos y de lento tránsito, incremento de la reducción química con la consecuente pérdida de elementos (caso de la transformación de nitratos a óxido nitroso), menor actividad de la biomasa microbiana heterótrofa aerobia y de la mesofauna, disminución del espacio de exploración de las raíces, se mejora el hábitat para el crecimiento y desarrollo de diversos organismos patógenos, entre otros.

En los estudios relacionados con la problemática de la compactación de los suelos, se emplean diverso tipo de indicadores, entre los que destacan la composición mineral del suelo o grupos texturales, su contenido de materia orgánica, densidad aparente y la variación de las constantes hídricas del suelo, ya sea cuantificadas de manera puntual o a través de establecer relaciones o interacciones cuantitativas entre dos o más de ellas.

Por lo anterior, esta investigación tuvo como propósito establecer un diagnóstico de las condiciones físicas y químicas edáficas en una zona agrícola irrigada, teniendo como estudio de caso la región Centro Golfo, Veracruz, para generar los indicadores de las propiedades y características edáficas, que permitan dilucidar el efecto de las prácticas agrícolas sobre la compactación del suelo.

## II REVISIÓN DE LITERATURA

### 2.1 El suelo como reservorio de agua para los cultivos

#### 2.1.1 Conceptos generales del suelo

En términos muy generales, el suelo se refiere al material sólido ubicado en la litósfera del planeta, que es susceptible de albergar organismos vivos y, dadas sus condiciones particulares, es viable emplearlo con fines agrícolas. Tiene su origen en las rocas que, a través de su descomposición paulatina, llega a formar ese material poroso del cual está hecho. Para ello, ocurren diversos procesos físicos, químicos y biológicos, los cuales descomponen y recombinan sus componentes iniciales, cambiando constantemente a diferentes velocidades durante las distintas eras geológicas (Jenny, 1994). De acuerdo con este autor, los cinco factores que contribuyen en la formación del suelo son los siguientes:

$$F_s = f(M_p, T, C, F, O_v)$$

De acuerdo con esta ecuación, la formación del suelo ( $F_s$ ) es consecuencia de la participación directa del material parental ( $M_p$ ), las condiciones topográficas o fisiografía ( $F$ ), organismos vivos ( $O_v$ ), tiempo transcurrido ( $T$ ) y clima ( $C$ ), además de su constante interacción. Todo esto en conjunto hace que se formen una gran diversidad de tipos de suelos, incluso aunque se tenga un mismo origen o roca madre, pues la velocidad con la que es alterada no es igual. Una forma de apreciar las diferencias en la formación de los suelos es a través de la observación de su perfil o corte en profundidad, donde quedan expuestas las capas superpuestas de las que está constituido, también llamados horizontes, los cuales son nombrados por letras y que a su vez presentan más subdivisiones (Weil y Brady, 2017):

- Horizonte A: es la capa superficial de un suelo no erosionado y si está desprovisto de vegetación, está expuesta directamente a la atmósfera. Es

denominado de eluviación por ser vulnerable a la lixiviación de los elementos químicos que ahí se encuentren, como consecuencia de la acción de la lluvia

- A<sub>00</sub>: Es la parte del horizonte A con abundante material orgánico que aún está sin descomponer (ramas, hojas, frutas y desechos animales, etc.)
- A<sub>0</sub>: Está debajo del A<sub>00</sub> y contiene material orgánico descompuesto o en vías de alteración por la acción de diversos organismos vivos
- A<sub>1</sub>: Es un horizonte en cuya composición predominan minerales, en interacción con materiales orgánicos en diferentes grados de alteración, lo que le da una coloración oscura
- A<sub>2</sub>: Su color es más claro que los demás, donde se presenta una tasa alta de lixiviación de minerales (eluviación)
- A<sub>3</sub>: Horizonte de transición entre el A y el B, razón por la cual posee características de los dos horizontes
- Horizonte B: Los elementos químicos que migran del horizonte A son recibidos en esta parte del suelo, por ello, a este horizonte se le conoce como de eluviación o de “ganancia elementos químicos”
  - B<sub>1</sub>: Es de transición y similar al A<sub>2</sub>, pero por su composición se asemeja a las condiciones que presenta el horizonte B
  - B<sub>2</sub>: Zona donde se aloja la mayor parte del material lixiviado desde el horizonte A. Esta zona de acumulación hace que sea rico en hierro, aluminio y calcio
  - B<sub>3</sub>: Es la transición entre el horizonte B y el C
- Horizonte C: Es la parte del perfil que está constituida por el material que dio origen al suelo, pero que está en proceso de descomposición o alteración. También se le suele conocer como subsuelo

- Horizonte D: Está formado principalmente por la roca madre y, como sinónimos, se suele emplear base rocosa, sustrato rocoso u horizonte R. Entonces es la roca consolidada de la que está compuesto el suelo de referencia.

Entonces, de acuerdo con la intensidad, duración y frecuencia con la que ocurran las variables que forman parte de la ecuación antes citada, ocasionará un grosor específico de cada horizonte, así como la presencia o ausencia de cada uno de ellos, situación que ocasiona una gran heterogeneidad a los suelos incluso de una misma región.

El suelo es un material poroso, razón por la cual básicamente está constituido por una fase sólida y, entre los poros que ahí se forman, coexisten los fluidos del medio edáfico, esto es, la fase líquida y la gaseosa.

La fase sólida está constituida por dos tipos de materiales, uno orgánico y el otro mineral. Este último proviene de la alteración de las rocas que paulatinamente van dando origen a la formación del suelo. Por ello, al material parental se le denomina mineral primario, así como todos aquellos fragmentos que posean la estructura y composición de los minerales que la componen, donde la única diferencia entre ellos es el tamaño. En seguimiento a lo anterior, entonces los minerales descompuestos a nivel químico se les conoce como minerales secundarios, los cuales poseen una composición estructural totalmente diferente de la cual derivaron, y esto es debido al efecto de los procesos formadores del suelo, que son las variables mostradas en la figura que se presentó líneas arriba.

Como ejemplo de los materiales primarios están la roca fragmentada, minerales de cuarzo, los feldespatos, entre muchos otros. Entre los materiales secundarios se destacan las arcillas, las cuales pueden ser filosilicatos del tipo 1:1 o 2:1, amorfas, sesquióxidos de hierro y aluminio, entre otras.

La arcilla es la fracción que más influye sobre las reacciones fisicoquímicas que ocurren en el suelo, lo cual se debe a su área específica de reacción, así como su capacidad de formar enlaces con elementos y compuestos de ambos signos. Por ello, también tienen la capacidad de retener agua, son responsables de los procesos

de expansión y contracción, entre otros fenómenos. En contraste, la arena y el limo tienen áreas muy pequeñas y eso les impide tener actividad fisicoquímica; sin embargo, son importantes para la formación de macro poros, que es en donde se llevan a cabo la mayor parte de los fenómenos capilares (Weil y Brady, 2017).

Entre estos cristales o minerales de arcilla, están los aluminosilicatos que están compuestos de dos unidades estructurales: un tetraedro de átomos de oxígeno que involucra un átomo de silicio ( $\text{Si}_4^+$ ) y un octaedro de átomos de oxígeno (o grupo hidroxilo) con un átomo de aluminio ( $\text{Al}_3^+$ ). Ambos se unen por sus vértices por medio de los átomos de oxígeno que se comparten para formar capas continuas. Aunque en principio son eléctricamente neutros, por las sustituciones isomórficas que ocurren durante su formación, se ocasiona la pérdida del equilibrio y expone sus cargas eléctricas que predominantemente son de signo negativo. Otra fuente de que ocurra un desequilibrio en la estabilidad de las cargas en los minerales de arcilla es la neutralización incompleta de los átomos en los extremos de los cristales y de los materiales orgánicos, por la acción de los iones presentes en la solución acuosa del suelo. Estos iones sólo quedan adsorbidos eléctricamente, pero no forman parte de la estructura cristalina y pueden ser reemplazados por otros, a lo cual se le denomina intercambio iónico, lo cual es fundamental para conservar o liberar nutrientes disponibles para las plantas, pero también fomentan otro tipo de reacciones en el medio edáfico.

En cuanto al componente orgánico de la fase sólida del suelo, está constituido por cadenas de enlaces donde el carbono, hidrógeno y oxígeno son por mucho los más abundantes, formando cadenas de distinta longitud y, por consiguiente, de muy distintas propiedades. Los materiales orgánicos en el suelo se encuentran en diversas etapas de transformación como consecuencia de la acción de diferentes organismos vivos, hasta la formación del humus, la cual es la fase más estable entre los múltiples procesos de descomposición.

La fase líquida del suelo también se define como “la solución del suelo” y esto va de acuerdo con su definición química, porque en este medio acuoso se encuentran

disueltos muy diversos compuestos orgánicos y sales minerales. Por tales razones, en este ambiente sólo se encuentran los elementos químicos en forma iónica, cuya reacción puede establecerse entre ellos mismos o con la fase sólida del suelo, ya sea con sus componentes orgánicos, inorgánicos o ambos.

Finalmente, la fase gaseosa se refiere al aire que circula entre los poros del suelo y su composición está ligeramente alterada en relación con el aire que se encuentra por encima de la superficie del suelo, aunque también puede variar de acuerdo a diversas condiciones. Por ello, es frecuente que el O<sub>2</sub> en la atmósfera del suelo sea menor respecto al de la superficie, pero el CO<sub>2</sub> será mayor como consecuencia de la actividad biológica que ocurre en el medio edáfico.

#### 2.1.2 Componentes de la fase sólida del suelo y su vinculación con la compactación del medio edáfico

Las partículas sólidas del suelo son muy variables en cuanto a su composición física y química. Desde el punto de vista físico, las partículas se dividen por su tamaño en tres fracciones texturales, esto es, las arenas que son las más grandes, los limos los cuales son partículas intermedias y las arcilla, las de menor tamaño. Estos términos son de uso frecuente y, por lo mismo se deja de lado que aún no hay un acuerdo sobre los límites de estas clases, sobre todo en lo que se refiere a la cota que delimita la frontera entre el limo grueso y la arena fina.

La escala con la se aprecian las diferentes partículas minerales del suelo van desde su observación a simple vista, como es el caso de los limos gruesos y las arenas, hasta los niveles microscópicos, por lo que cuando se intenta estudiar partículas del tamaño de los limos medios, finos y arcillas, se requiere el empleo de herramientas tecnológicas especializadas como microscopios electrónicos, difractómetros, entre otros.

En todo caso, las distintas partículas interactúan entre sí, sin importar su tamaño para formar diversas combinaciones, las cuales constituyen los grupos texturales, aunque desde luego en este criterio no se incluye su composición química, pero sí

incide claramente en la susceptibilidad de los terrenos agrícolas a la magnitud e intensidad de los fenómenos físicos que se presenten, ya sea como consecuencia del ambiente o del mismo manejo. Lo anterior es importante de tomar en cuenta, puesto que de acuerdo con lo planteado por Nawaz *et al* (2013), cuando un suelo está expuesto a una carga de tráfico vehicular, su textura es una de las variables que inciden sobre su grado de afectación, con efectos directos sobre las propiedades físicas, razón por la cual dicha variable suele ser considerada para evaluar la compactación del suelo.

La distribución del tamaño de partículas se conoce como análisis mecánico del suelo, donde el material es igual o menor a 2 mm y se basa en la propuesta que estableció Stokes en 1851. La separación de las partículas se realiza en agua disolver agregados. Para las de menor diámetro, se sedimentan a través de su dispersión en una suspensión acuosa, donde se toma en cuenta la velocidad con que se presenta este fenómeno, puesto que en su caída libre bajo vacío no encuentra resistencia al movimiento y su velocidad está relacionada con la gravedad, así como la fricción que pudiese presentar, lo cual es función de su radio y la viscosidad del medio. Debido a esta resistencia, la partícula alcanza una tasa constante de caída (sin aceleración), mientras que la última fuerza que actúa sobre la partícula es su peso en sentido descendente. Los avances en la física de medios granulares y la mecánica del suelo relacionados con la compactación del suelo, son los recursos que se están empleando para su modelación (Nawaz *et al.*, 2013).

Según la distribución espacial de las partículas minerales, se crea una estructura específica, la cual define la geometría de los espacios porosos. Dado a que la disposición de las partículas es muy compleja, no permite su caracterización e imposibilita cuantificar la estructura de un suelo y por ello sólo se considera como una variable cualitativa. Al respecto, el agrupamiento de partículas da lugar a la formación de agregados y de ellos depende en gran medida la forma, disposición y tamaño del espacio poroso. De acuerdo con Alaoui *et al* (2011), la reorganización de los agregados y terrones por contracción o expansión, afectan la geometría de

los poros de los suelos agrícolas y, por consiguiente, dichos cambios estructurales del afectan directamente al movimiento del agua del suelo, por alterar las propiedades hidráulicas, así como la conductividad hidráulica. Entonces, su compactación del suelo es considerada como una forma física de degradación que altera la estructura del suelo, limita la infiltración de agua y aire, además de reducir la penetración de las raíces en el suelo (Nawaz *et al.*, 2013).

Un suelo bien agregado o estructurado se relaciona con la formación de poros cuya distribución permite que haya una circulación apropiada de los fluidos del medio (aire y agua). Por ello, podría suponerse que, si hay un predominio de macro poros, habrá mejores condiciones para el crecimiento del sistema radical, mayor facilidad de manejo agrícola y la circulación de la solución del suelo. A pesar de lo anterior, según advierten Arvidsson y Håkansson (2014), los estudios sistemáticos que se relacionan con de las diferencias entre las especies de cultivos en su respuesta a la compactación. De acuerdo con dichos autores, la densidad aparente cuantificada después del paso de la maquinaria agrícola, los cereales de grano pequeño son más resistentes a la disminución del espacio poroso (a excepción de la avena), respecto a las dicotiledóneas.

En contraste a dichas aseveraciones, Alameda *et al* (2012) encontraron que la compactación afecta significativamente el rendimiento de los cultivos en general, por ser un factor de estrés. Estos autores evaluaron la severidad de dicha condición física en combinación con sombreado, baja disponibilidad de agua y estrés mecánico en plantas de tabaco. Si el medio de cultivo no era restrictivo, encontraron que la planta creció de manera directa con el incremento de la densidad aparente hasta un valor de  $1,4 \text{ g cm}^{-3}$ , lo cual coincide con Arvidsson y Håkansson (2014), quienes muestran una relación no lineal entre la densidad aparente y el rendimiento de los cultivos, donde al llegar a un valor máximo, se manifiesta un efecto depresor sobre la planta. Más aún, Alameda *et al* (2012) reportaron que el efecto deletéreo de la compactación se intensifica, al interaccionar con otras variables, magnificando la condición de estrés que, en casos extremos, se provocará la deformación de las

raíces, ocasionará problemas en germinación, formación de rebrotes y una alta tasa de mortalidad de las plantas cultivadas (Nawaz *et al* 2013).

Desde el punto de vista cualitativo, la composición mineral de la fase sólida se divide en minerales primarios, óxidos, sales, materiales orgánicos, minerales secundarios, lo cual influye en la capacidad de aporte nutrimental de los suelos. La abundancia del calcio, magnesio, potasio y hierro, es función de la presencia de los minerales primarios, pero la cantidad de fósforo, cobre, zinc, molibdeno y boro es menor, así como un déficit importante en nitrógeno y azufre. En contraste, los óxidos y sales aportan más calcio, magnesio, azufre y hierro, donde la influencia de los carbonatos es más evidente en el amortiguamiento del medio químico. Los óxidos actúan como agentes cementantes entre partículas, lo que permite la formación de agregados. Los óxidos e hidróxidos de hierro y aluminio son frecuentes en los suelos, ya sea que estén en su forma cristalina o como material amorfo. Según el medio químico de la solución del suelo (pH y concentración salina), se disocian los grupos  $H^+$  u  $OH^-$  y esto le confiere al medio su capacidad para adsorber cationes o aniones en los sitios correspondientes, lo que contribuye de manera significativa a su capacidad de intercambio iónico del suelo (Massah y Azadegan, 2016).

Otro componente del medio edáfico es la materia orgánica, la cual en la mayoría de los suelos minerales su concentración es menor a 5%, aunque en los terrenos agrícolas suele ser incluso inferior a 2%. Es la parte de la fracción sólida que está constituida por materiales orgánicos sólidos de origen vegetal o animal, en sus más variados grados de descomposición y transformación, incluyendo el humus, que es la etapa más estable, lo cual todo esto en conjunto es por la acción de diversos organismos vivos, cuya actividad es modificada por las condiciones de humedad y temperatura del medio edáfico (Chamen *et al.*, 2015).

Su composición, aunque es muy heterogénea, es viable agruparla de acuerdo con su susceptibilidad a ser descompuesta en carbohidratos (azúcares, almidón, celulosa y hemicelulosa); lignina; taninos; glicósidos; ácidos orgánicos, sales y ésteres; grasas, aceites y ceras; resinas; compuestos nitrogenados (proteínas,

aminoácidos, grupos aminos, etc.); pigmentos (clorofila, xantofila, etc.); y componentes minerales (sales, ácidos, bases, etc.). A manera de orientación, es frecuente emplear a la relación C/N como indicador de la velocidad con la que puede descomponerse un material orgánico, pero para tener mayor certeza, es preferible basarse en la calidad del carbono que lo constituye. El tiempo de transformación es variable para cada tipo de residuo, ya que los microorganismos extraen la energía del carbono y utilizan el nitrógeno en su metabolismo, donde ambos se liberan a través del proceso de mineralización, donde la biomasa microbiana consume al menos dos tercios de la materia orgánica para obtener energía e incorpora un tercio en su tejido. Su descomposición conduce a la producción de energía, a la formación de productos simples como CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, sales minerales ricos en nitrógeno y fósforo, así como la acumulación de materiales orgánicos muy estables (humus) de alto peso molecular, los cuales varían entre 2000 y 4000 g, los cuales, aunque no participan de manera directa en el aporte nutrimental, sus radicales libres estructurales hacen que se incremente de manera considerable la capacidad de intercambio catiónico, aumenta su capacidad de amortiguar el ambiente químico del medio edáfico (Shah *et al.*, 2017).

Desde el punto de vista nutrimental, es la principal fuente de nitrógeno para los cultivos, pero también contribuye de manera significativa en la cantidad de azufre disponible y, en menor medida, de fósforo. En cuanto a su capacidad de reacción, la disociación de los grupos -COOH, OH<sup>-</sup> y NH<sub>2</sub> propicia una mayor superficie específica, lo que favorece la formación de complejos con diversos elementos, entre los que destacan el hierro, manganeso, calcio y magnesio (Barzegar *et al.*, 2016). Lo anterior depende en gran medida de las diferencias en la densidad de carga superficial y la superficie total de las partículas sólidas por unidad de masa del suelo. Por ejemplo, la superficie específica de la arena es cuando mucho 1 m<sup>2</sup> g<sup>-1</sup>, las arcillas que son del tipo de la montorillonita tienen más de 80 m<sup>2</sup> g<sup>-1</sup>, mientras que la materia orgánica puede llegar incluso a 500 m<sup>2</sup> g<sup>-1</sup>, razón por la cual la capacidad de intercambio catiónico de los ácidos húmicos llegue a triplicar la de las arcillas del tipo 2:1 (Hussain *et al.*, 2020).

En referencia a la función de la materia orgánica en los procesos físicos, permite contrarrestar la compactación del suelo, porque propicia el incremento de los macro poros y su continuidad, los cuales son los que se reducen ante dicho fenómeno, pero no así los microporos (Kuncoro *et al.*, 2014). Al respecto, cabe mencionar que la compactación disminuye la biodiversidad edáfica, porque afecta a la biomasa microbiana, la actividad enzimática, la fauna del suelo y la flora del suelo, lo cual es atribuible fundamentalmente a la disminución de la tasa de difusión del oxígeno que circula a través del sistema poroso, el cual posee poros de diverso tamaño y forma, que en conjunto condicionan el paso de los fluidos (Nawaz *et al.*, 2013).

El vínculo entre las tres fases del suelo (sólida-líquida-gaseosa) y sus interacciones se suelen describir a través de la relación masa-volumen, lo que nos lleva a la densidad de las partículas sólidas. Si no incluye el espacio poroso, se le conoce como densidad real y si se considera, entonces será densidad aparente, la cual es una cantidad relativa obtenida entre la masa específica de los sólidos del suelo y la masa específica del agua a 25°C (Berisso *et al.*, 2012). Esa característica depende de la constitución del suelo y, en el caso de la densidad real, cambia muy poco entre los diferentes suelos, indistintamente de los minerales que lo componen. Su valor es igual al de las rocas que le dieron origen, por eso, si llegase a ser formado a partir de la alteración del cuarzo, tendrá un valor de 2650 kg m<sup>-3</sup>, razón por la cual, la densidad de partículas del suelo oscilará alrededor de ese valor. El promedio para casi todos los suelos minerales es de 2700 kg m<sup>-3</sup>, oscilando entre 2650 kg m<sup>-3</sup> para los muy arenosos y 2710 kg m<sup>-3</sup> para los muy arcillosos. Entonces, como en la densidad aparente se incluye el espacio poroso del suelo, esta variable suele preferirse para emplearse como indicador del grado de compactación del suelo. En el caso de los arenosos, la disposición o distribución de las partículas es limitado, quedando espacios grandes entre ellas y es a lo que se le denomina arbitrariamente como macro poros y por lo mismo, su volumen total es pequeño, con densidades entre 1400 y 1800 kg m<sup>-3</sup>. En contraste, para los suelos arcillosos, las posibilidades de distribución y arreglo entre las partículas minerales que los constituyen son mucho mayores, lo que da como consecuencia la formación de espacios muy

pequeños, razón por la cual se les llama microporos, aunque el volumen de los poros es relativamente grande y la densidad fluctúa entre 900 y 1600 kg m<sup>-3</sup>, lo cual varía en relación inversa a la cantidad de fracción fina que contenga el suelo (Chamen *et al.*, 2015).

Desde luego, la porosidad total se reduce según el nivel de compactación a la que se sometió el suelo. Como ya se mencionó previamente, la definición del tamaño de los poros es arbitraria; sin embargo, esto da una idea práctica de su utilidad. Por ejemplo, los poros más grandes (macro poros), son fundamentales para permitir la aireación del suelo y un flujo rápida del agua, mientras que los microporos contienen un mayor volumen de agua y su circulación es muy lenta. Al respecto, como es de esperarse, los suelos poseen una gran diversidad de tamaños de partículas, con muy diferentes arreglos, a pesar de ello, su porosidad fluctúa alrededor de 50%, aunque su tamaño será muy distinto (Bogunovic *et al.*, 2018).

## 2.2 La materia orgánica y su influencia sobre la compactación del suelo y su capacidad de almacenamiento de agua

### 2.2.1 Características de la solución del suelo

El agua presente en el medio edáfico se caracteriza por un estado específico de energía y según se trate, determina su estado o condición. Las variables que están involucradas son de tipo termodinámico, en las que se establecen relaciones de tipo energético e involucran a distintos sistemas. Por lo anterior y con el propósito de estudiar las interacciones que ahí se presentan, es necesario definir previamente las condiciones del sistema de interés, así como los límites que lo acoten.

Es importante resaltar que la delimitación de las fronteras de todo sistema obedece a criterios arbitrarios, los cuales están sujetos al motivo central del estudio. En el caso del agua presente en el medio edáfico, el énfasis está puesto en el agua líquida, en la que se incluye a todos sus componentes (iones, moléculas, gases disueltos), en la que sus límites se establecen como la zona de exploración de la

biomasa radical. De acuerdo con Bogunovic y Kistic (2014), los sistemas de labranza influyen sobre la capacidad de almacenamiento de agua por el suelo, cuyo un impacto es diferente incluso a distintas profundidades. Estos autores indican que se pueden presentar cambios en la capa arable de 277 a 910 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>, mientras que una profundidad mayor (hasta 40 cm) puede variar de 337 a 814 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>, lo cual está sujeto al período del año en que se evalúa.

En la fase líquida edáfica vista como sistema, su volumen está condicionado al agua líquida contenida en el espacio poroso del suelo. Por lo mismo, sus límites son muy difíciles de establecer, puesto que obedecen a la tortuosidad de su interconexión, la cual es muy cambiante. Además, habrá que contemplar las interfaces agua-aire y agua-sólido, que también están distribuidas en el interior de los poros.

En cuanto a la forma e interconexión del espacio poroso, su prevalencia es efímera, donde el mismo crecimiento de la biomasa radical influye en ello. Por ejemplo, las rotaciones de cultivos que incluyen especies de cultivos de cobertura, ayudan a aliviar los efectos nocivos de la compactación del suelo, puesto que la distribución de sus raíces modifica las condiciones físicas del suelo. Por ejemplo, los cultivos de cobertura con Brassicas reducen las limitaciones en la resistencia del suelo e incrementan la permeabilidad del aire, aunque la magnitud de tales aumentos pudiera ser menor a la disminución por la compactación (Chen *et al.*, 2014).

En ocasiones se incluye en el sistema el vapor de agua, aunque en realidad es un componente de la fase gaseosa del suelo, que, en general, está en equilibrio con la fase líquida. El medio edáfico se considera como la parte sólida o matriz del suelo y los demás gases del aire del suelo, con los que el sistema líquido mantiene relaciones energéticas. Las relaciones energéticas entre el sistema en cuestión y el medio se separan en dos tipos: mecánica y térmica. En el primer caso se atribuye a la acción de las fuerzas, mientras que la segunda es debida a las diferencias de temperatura en el medio. Las fuerzas dan lugar a las acciones de tipo mecánico y dan movimiento al agua, el cual se manifiesta en las diferentes partes de un sistema más grande, que es el vínculo entre el suelo, la planta y la atmósfera. El tránsito del

agua a través de sus componentes es muy lento y su energía cinética (proporcional al cuadrado de la velocidad) resulta no significativa en la mayoría de los casos. Por lo anterior, es evidente que no da igual abordar el flujo del agua en el medio edáfico o en su transporte hacia la atmósfera, como si se tratase del agua que circula a través de los canales de riego, donde la energía cinética es básica, así como el teorema de la hidrodinámica de Bernoulli. Por lo anterior, la caracterización del estado de energía del agua del suelo es función de su energía potencial, así como de la posición y el estado interno en el punto que se esté considerando.

En el caso del vapor de agua, resaltan la energía térmica y el trabajo de presión, mientras que, en el agua líquida, el trabajo gravitacional es el relevante. Por tales razones, la interacción entre el agua y la matriz sólida del suelo implican diversas fuerzas como son las capilares, la adsorción, las de tipo eléctrico y otras más, Como consecuencia, el término que se emplea para abarcar tales procesos se simplifica definiéndolo como fuerza de la matriz del suelo o simplemente fuerza matricial. La compactación del suelo tiene un efecto contrastante, porque es de tipo positivo sobre la resistencia del suelo, pero esto es negativo respecto al crecimiento de la vegetación. Por ello, Garg *et al.*, (2020) al analizar los efectos de la compactación (65%, 80% y 95%) sobre la permeabilidad de la fase gaseosa del suelo, encontraron que la tasa de circulación de los fluidos es influida más por el vínculo con la matriz del suelo, lo que altera su velocidad de infiltración, seguido por el contenido de agua y por último, el grado de compactación.

La concentración de solutos en el agua, lleva implícito un trabajo químico y, como tal, las relaciones entre el sistema acuoso con el medio sólido, el agua supone un estado de energía descrito a través de funciones termodinámicas, entre las que destaca la energía libre, donde ejerce una influencia específica sobre el sistema suelo-planta-atmósfera que se define como potencial total del agua. Dicho potencial de agua mantiene una relación diferencial entre diversos puntos del sistema y, como consecuencia, origina el desplazamiento de la fase líquida ya sea en el suelo o a través de todo el sistema, circulando a través de la planta hasta llegar a la atmósfera.

En la naturaleza, la tendencia espontánea y universal de toda la materia es procurar llegar a un estado de energía mínima, tratando de encontrar un equilibrio con el ambiente, razón por la cual el agua obedece a dicha tendencia universal y se mueve de manera constante en la dirección que propicie la disminución de su potencial total. La tasa de disminución potencial a través de seguir por una dirección concreta se emplea para medir la fuerza que es responsable de tal movimiento. Entonces, si se conoce su estado de energía en cada punto del sistema, es viable calcular las fuerzas que actúan sobre el agua y con ello, evaluar su condición actual y su relación con el estado de equilibrio. La compactación del suelo es una amenaza creciente para la circulación de los fluidos del medio edáfico y, como consecuencia, sobre la producción de cultivos, donde el manejo del suelo es una variable determinante. Por ejemplo, se ha demostrado que el sistema de labranza altera la compactación del suelo y modifica su capacidad de retención de humedad, lo cual incluso llega su efecto hasta 40 cm de profundidad (Bogunovic y Kisic, 2014).

De acuerdo con lo aquí comentado, el concepto de potencial total de agua da idea más clara de lo que es la fase líquida, sin tener la necesidad de caer en las categorías arbitrarias en las que el agua del suelo se ha subdividido de manera tradicional, como son el agua gravitacional, el agua capilar y el agua higroscópica. Más aún, el agua del suelo está afectada por el campo gravitacional terrestre, lo que permitiría generalizar a todas las moléculas con la definición de agua gravitacional, en donde las leyes capilares no explican de manera integral el fenómeno que está relacionado con la capacidad de retención del agua en el medio edáfico, donde el agua sigue siendo la misma en cualquier posición y tiempo en su interacción con la fase sólida, por lo que no difiere en su forma, sólo con su estado de energía.

Tal y como ya se puntualizó, la compactación del suelo conduce a un suministro insuficiente de agua, lo que afecta de manera negativa la tasa de crecimiento y desarrollo de las plantas, donde se altera la eficiencia del uso del agua, variando de manera indirecta respecto al incremento de la densidad aparente, como indicador de la disminución del espacio poroso. Como consecuencia, habrá un mayor estrés

hídrico y una menor productividad de los cultivos agrícolas (Barzegar *et al.*, 2016). Aunque dichos autores sostienen que, si a través del riego se mantiene la humedad del suelo a 80% de la capacidad de campo, Bogunovic y Kisic (2014) concluyen que esto es más complejo, porque las condiciones climáticas y los sistemas de labranza tienen un efecto diferente sobre la resistencia del suelo y por consiguiente, sobre la capacidad de retención y flujo de la fase líquida del suelo.

### 2.2.2 Potencial hídrico del suelo

El vapor de agua en la atmósfera es un sistema gaseoso inerte que está suspendido en el aire por encontrarse en equilibrio con la fuerza gravitacional. Al combinarse con el aire, se integra como un componente más y al llegar a una concentración máxima, satura el aire, cuyo exceso se condensa en la fase líquida. En seguimiento a lo anterior, el agrupamiento en pequeños núcleos de condensación da lugar a la formación de gotas, las cuales van creciendo en tamaño y esto las hace vulnerables a la acción de la gravedad, razón por la cual y de manera indefectible, superará su efecto sobre las demás fuerzas, por lo que como consecuencia originará su precipitación en forma de lluvia. Las propiedades físicas del agua se atribuyen al puente de hidrógeno que vincula a su estado sólido y líquido entre sí, el cual permite que sus moléculas se unan entre sí por cohesión y, cuando son de compuestos diferentes, lo hace por adhesión. De esta manera, se mantiene en forma líquida para que se lleven a cabo los procesos fisiológicos, cuando otras sustancias con peso molecular similar están en forma de vapor a la misma temperatura. A excepción del amoníaco, tiene un mayor calor específico respecto a cualquier otra sustancia, así como su calor latente de vaporización y de fusión.

El agua se mueve en respuesta a gradientes de energía, los cuales son función de la energía máxima disponible para convertirse en trabajo, cuando se mantiene constante la temperatura y presión. En otras palabras, es el trabajo neto que se obtiene si se mantienen constantes la temperatura y la presión, cuando la reacción es reversible. Lo anterior es conocido como energía libre (energía de Gibbs,  $G$ ), cuyo concepto integra el total de la energía disponible en el sistema, a excepción

de la que se invierte como consecuencia de la entropía. Cabe señalar que estos conceptos son básicamente teóricos, porque no se conocen con precisión el valor de la energía interna y de la entropía, lo que impide calcular G. A pesar de ello, es viable identificar los cambios en la energía libre entre dos estados de un mismo sistema, para lo cual se toma en cuenta la constante universal de los gases ideales, la temperatura y la relación entre la actividad de los productos respecto a la de los reactantes. Con base en los conceptos en discusión, se puede inferir que la magnitud de la energía libre es función del volumen de agua, donde la relación entre ambas variables se modifica de manera directa. Por ello, para evaluar la energía de un sistema, es necesario estandarizarla según el peso molecular de las sustancias, así ya se tendrán resultados que no dependan de la cantidad involucrada.

Con el potencial químico se describe el trabajo que puede realizar un mol de moléculas de la sustancia involucrada y es independiente de su cantidad. Su interés radica en su vínculo con el potencial químico del agua, el cual se presenta en un sistema y es contrastado con el que adquiere en un medio puro bajo condiciones estándares de presión atmosférica (0,1 MPa) a igual temperatura y altitud de comparación.

El potencial hídrico se expresa en unidades de presión, el cual se obtiene con base en el cociente de la diferencia del potencial químico del sistema de interés y la que se tiene en el medio puro, respecto al volumen molar parcial del agua (18 cm<sup>3</sup> mol<sup>-1</sup>). Esta última variable ha sido muy útil por ser constante en múltiples condiciones tanto para el agua contenida a nivel celular como en el suelo, aunque habrá de tomarse en cuenta que esto pudiese variar cuando el medio acuoso cuando el mol de agua no ocupe los 18 cm<sup>3</sup> en comentario, lo cual ocurre ya sea porque esté muy concentrado por abundancia de solutos, por deshidratación severa o cuando el potencial hídrico sea cercano al punto de marchitez permanente. Attom *et al* (2016) encontraron que las propiedades relacionadas con la susceptibilidad del suelo a la compactación son afectadas por el uso de aguas residuales tratadas, mejorando la capacidad de circulación de los fluidos en suelos arcillosos

Las moléculas de agua se mueven de manera continua sin seguir una dirección en particular y eso les permite trasladarse por difusión. Este proceso se define como el desplazamiento total de las moléculas en el sentido inverso a su energía libre, esto es, de zonas de mayor a menor energía libre y cesará su movimiento cuando se alcance el equilibrio. Los gradientes de potencial hídrico producen la fuerza que impulsa la difusión, la cual inicia por el movimiento al azar de las moléculas de acuerdo a los cambios en temperatura, a la concentración (actividad) de la solución, diferencias de presión o de hidratación, lo cual también tiene relación con lo que ocurre en el medio edáfico (Hu *et al.*, 2020).

Como el movimiento se da por difusión, entonces siempre será de la zona de mayor condición hacia la de menor condición. Por lo tanto, si es cuestión de temperatura, el desplazamiento será desde la parte más calurosa hacia la más fría. Bajo la misma premisa y en referencia a la abundancia de los solutos (iones minerales o de tipo orgánico), la diferencia en su concentración dictará el sentido del desplazamiento del agua, ya que ocasiona un gradiente en el potencial hídrico, razón por la cual la difusión impulsa el movimiento del agua en el suelo. Al respecto, cabe hacer mención que sin importar la concentración del agua (solvente), los solutos reducen el potencial químico del solvente, debido a la disminución de su concentración. En seguimiento a lo anterior, cuando hay la presencia de una membrana que es semipermeable, esta impedirá el paso del soluto, haciendo que el agua se mueva en sentido contrario, esto es, desde la solución diluida a la concentrada, fenómeno conocido como osmosis y, a través de este mecanismo, es como el agua puede entrar hacia el interior de las células. Al respecto, las prácticas agrícolas modifican la intensidad de los procesos, por ejemplo, con la adición de material orgánico se es capaz de aumentar la capacidad de retención de agua del suelo y, por lo tanto, promover el crecimiento de los cultivos. Esto se debe a que los compuestos orgánicos se incrustan en las partículas de arcilla y su espacio poroso, propiciando el incremento del almacenamiento hídrico (Wong *et al.*, 2017).

De acuerdo con Alameda y Villar (2012), la relación de las raíces con la matriz de suelo ofrece una serie de condiciones diferentes y contrastantes, la cual afecta su anatomía, estructura y función. Las condiciones químicas del suelo y su textura influyen sobre los cambios en las raíces, pero no tanto como la compactación, la cual explica en gran parte la variación en la morfología y la anatomía de las raíces, afectando negativamente la proporción de raíces finas, su longitud específica y la proporción de xilema, donde la excepción ocurre sólo en aquellas plantas que exhiban una alta plasticidad radicular.

Entre los gradientes en discusión, cuando la presión del medio aumenta, también se incrementa la energía libre y con ello el potencial químico del sistema, donde al igual que los casos ya comentados, el agua se desplazará en el sentido de la zona de mayor a la de menor presión, fenómeno que permite el movimiento hídrico a través del sistema vascular de las plantas.

Las superficies capaces de reaccionar con los electrolitos del medio, como son las arcillas del suelo o la materia orgánica a través de las proteínas o polisacáridos de la pared celular, también son muy afines a las moléculas de agua. Esto también ocurre en superficies que no cuenten con enlaces expuestos, ya que pueden hidratarse mediante los puentes de hidrógeno y ocurren de manera espontánea con liberación de energía. De acuerdo con estos conceptos, es importante hacer ver que tanto los poros en la fracción mineral del medio edáfico, como los componentes de la pared celular de los materiales orgánicos, cuentan con una matriz de hidratación capaz de atraer el agua y retenerla con la suficiente fuerza como para almacenarla, aunque también habrá que tomar en cuenta que la compactación del suelo afecta la estructura de los poros y, por lo tanto, el crecimiento de las raíces de las plantas (Lipiec *et al.*, 2012).

Es evidente que el agua se moverá en respuesta a las variables que sean capaces de causar un gradiente en el potencial hídrico, cuya dirección de desplazamiento será de la zona de mayor potencial a la de menor potencial hídrico. Hartmann *et al* (2014) evaluaron la resistencia estructural y la resiliencia del microbioma en suelos

forestales compactados y su relación con los cambios en las propiedades físicas y funciones del suelo. Las alteraciones en la porosidad del suelo limitaron de manera significativa la conductividad del aire y el agua, donde los suelos arcillosos fueron más vulnerables que los arenosos. Respecto a la biomasa microbiana, se afectó de manera negativa su abundancia y estructura, pero aumentó su diversidad donde los hongos fueron menos resistentes respecto a las bacterias.

La velocidad de difusión es función de tres variables, una es la magnitud del gradiente de potencial hídrico en relación con la distancia a recorrer, otra es la permeabilidad del medio en que esto ocurre y la tercera, la temperatura. Entonces, la velocidad de difusión de una sustancia en una zona en particular depende del tamaño y forma de la molécula, así como del gradiente de su concentración. Por lo tanto, mientras menor sea la distancia por recorrer, mayor será la velocidad de su difusión, obviamente considerando que el desplazamiento ocurre de mayor a menor concentración. Cuando estos conceptos se trasladan al interior de las células, la velocidad de difusión también cumple los preceptos ya comentados, esto es, será mayor a medida que la distancia sea menor y viceversa. También se deberá tomar en cuenta que la respuesta anatómica primaria de las raíces de las plantas a la compactación del suelo ocasiona la deformación celular, la cual está asociada a la corteza. Por ello, no todas las especies vegetales reaccionan de igual manera a la reducción del espacio poroso, donde el alargamiento de su raíz está en relación con su plasticidad en respuesta a la compactación del medio, así como la fuerza del entorno alrededor de la biomasa radical (Lipiec *et al.*, 2012)

La temperatura influye en la velocidad con la que se desplazan las partículas y con ello su difusión, pero esto no aplica dentro del ámbito de los organismos vivos, ya que se tienen su velocidad de difusión sólo aumenta 1.03 veces por cada 10°C de incremento de temperatura ( $Q=1.03$ ). El valor de Q será mayor cuando se rompan los puentes de hidrógeno entre las moléculas de agua, situación que promoverá que los solutos sean capaces de difundirse con mayor rapidez, lo cual es debido a la disminución de la viscosidad del agua. Los cambios de presión modifican la

velocidad de los fluidos, lo cual es función de las diferencias en el diámetro de la tubería donde se desplaza, ya sea que se refiera a los tejidos conductores de las plantas o los poros en el suelo. Por lo tanto, entonces en esto también está involucrada la superficie a recorrer, su radio y la viscosidad del fluido, donde la velocidad se intensifica exponencialmente a medida que la vía de conducción sea mayor (Blanco-Canqui, 2017).

### 2.2.3 Influencia de la materia orgánica sobre la compactación del suelo

Las prácticas de manejo suelen ser una de las principales causas que afectan al suelo, como es el caso del uso de maquinaria pesada, porque llegan a causar una compresión persistente en el subsuelo persistente. Al disminuir el espacio poroso del medio, las afectaciones se hacen más evidentes porque hay una restricción sobre el crecimiento de las raíces, se crea una disminución significativa en la tasa de difusión del oxígeno y, por consiguiente, una mala aireación de la biomasa radical, así como la propensión a tener un drenaje deficiente, lo cual incrementa aún más la capacidad de aireación del suelo. Esto en conjunto, contribuye a que haya menos oxígeno en la zona radicular y que se favorezcan las pérdidas de nitrógeno por desnitrificación (Alameda y Villar, 2012).

Por lo comentado, se ha considerado que el subsolar puede aliviar los problemas de compactación, los cuales suelen operar a profundidades incluso a 50 cm de profundidad con la idea de aflojar el suelo, manteniendo el propósito con ello de aliviar el problema de la compactación y así mejorar tanto la infiltración del agua como la aireación de la zona de exploración de las raíces. Dado lo apremiante que llega a ser la compactación en diversos lugares, el efecto de subsolar se aprecia sobre el incremento de la productividad en los terrenos que han sido afectados; sin embargo, esta modificación de las condiciones físicas solo tiene un impacto benéfico temporal, porque como no se incidió sobre la causa del problema y sólo se atendió el síntoma, se continúa con las mismas prácticas y. por ende, los terrenos nuevamente se compactarán.

Según Arvidsson y Håkansson (2014), Hay zonas que no requieren del subsolado, incluso aunque se cultiven bajo el sistema de siembra directa, pero hay otros sitios que, bajo ese mismo método de laboreo del suelo, se ha visto que la labranza profunda sí ha tenido un impacto benéfico significativo sobre el rendimiento de los cultivos. Cuando el subsolado retira las capas endurecidas del subsuelo, es indispensable que el tráfico se controle o la compactación nuevamente ocurrirá, o bien, si no existía, el uso intensivo de la maquinaria agrícola la creará. Más aún, cuando se practica el subsolado cuando el suelo está húmedo, es muy probable que se ocasione una compactación adicional, incluso en terrenos donde la textura sea franco-arenosa o arenosa.

Las condiciones de humedad de la zona pueden también fomentar la compactación de los terrenos, esto se debe a dos razones, una es atribuida al impacto de la lluvia sobre todo cuando los terrenos no están protegidos mediante coberturas vegetales (suelos desnudos) y la otra, porque la infiltración a través del suelo crea condiciones suficientes para que haya una disminución del espacio poroso, sobre todo cuando las prácticas agrícolas no previenen esta situación, como es el caso del escaso o nulo manejo de materiales orgánicos, puesto que si la concentración de materia orgánica es escasa, el suelo será más susceptible a la compactación. A pesar de ello, una alternativa viable sería el manejo de coberturas vegetales o de residuos orgánicos depositados sobre la superficie del terreno, los cuales amortiguan el impacto de la maquinaria y reducen su compresión (Bogunovic *et al.*, 2018).

Los residuos forman un mantillo que, aunque sean sometidos a alguna fuerza de compresión, al cesar esa opresión, tienen la facultad de retornar y conservar su forma y estructura. No obstante, si persiste un tráfico intensivo o excesivo, esto logrará vencer su resiliencia y alterará la composición de los residuos orgánicos, lo cual también propiciará que se acelere su tasa de descomposición y con ello se tendrá un menor tiempo de residencia de los compuestos orgánicos. Al respecto, habrá que tomar en cuenta que los residuos orgánicos distribuidos en el perfil del suelo, son más valiosos que cuando sólo se dejan sobre la superficie del terreno.

Esto se debe a que la materia orgánica compuesta de diferentes grados de alteración o descomposición, se unen a las partículas del suelo, sobre todo a la fracción fina en general y a la arcilla en particular, lo que incrementa la resistencia del medio y hace más difícil que las partículas del suelo se compacten, uniendo entre sí a agregados de diferente tamaño. Por lo tanto, si el suelo se mantiene con una baja concentración de materia orgánica, será más vulnerable a la compactación del terreno (Berisso *et al.*, 2012).

De acuerdo con Lal (2004), en los últimos cien años de actividad agrícola intensiva, la repercusión de los sistemas de laboreo sobre el suelo ha significado una disminución en 60% de la cantidad de materia orgánica, razón por la cual sólo queda aproximadamente 40% de las reservas de carbono orgánico edáfico. Esto es muy importante, porque el carbono es la fuente de energía para el metabolismo de la biomasa microbiana del suelo, la cual constituye la capacidad de aporte nutrimental del suelo, así como su reciclaje.

Desde el punto de vista químico y biológico, el humus es la forma de carbono más estable en el suelo, el cual su tiempo de residencia es de varios siglos de antigüedad porque ya no es soluble en agua. Posee la capacidad de unir las partículas de arcilla entre sí, para formar micro agregados de manera firme, puesto que no por su propia constitución bioquímica, no es alterado fácilmente por los microorganismos. Por ello, es más resistente al laboreo y a la degradación, en comparación con otras formas carbonadas del suelo, como el carbono activo. El carbono activo está constituido por carbohidratos de diferente longitud de cadenas carbonadas (azúcares simples, polisacáridos, etc.) proteínas, fenoles y otros compuestos que son empleados por la biomasa microbiana como fuente de energía para cumplir con sus necesidades metabólicas. Estos compuestos son más propensos a descomponerse por efecto del laboreo, pero en condiciones naturales o en sistemas de no laboreo, se conservan a través del tiempo. La función de este tipo de sustancias carbonadas es la de servir de medio de cohesión entre partículas minerales, formando agregados de diferente tamaño, lo cual a su vez fomenta la porosidad del suelo y con ello,

promueve la infiltración de agua, la aireación del suelo, mejora la estructura de su estructura, entre otros beneficios, lo cual se suele reflejar en el valor de su densidad aparente al haber una menor compactación (Chamen *et al.*, 2015)

El tamaño de los micro agregados varía entre 20 y 250  $\mu\text{m}$ , los cuales, por su origen y dimensión, suelen ser muy estables. Se forman con base en las microestructuras de la fracción fina de los minerales del suelo (arcillas y limo), en combinación con los materiales orgánicos en descomposición, así como por la acción de las hifas de los hongos micorrícicos del medio edáfico (Attom *et al.*, 2016). De acuerdo con Esteban *et al.*, (2019), las raíces y la biomasa microbiana del suelo son capaces de hacer recombinaciones entre los micro agregados hasta lograr la formación de macro agregados. Este tipo de conglomerados orgánicos y minerales están unidos entre sí, básicamente por la acción de las hifas de los hongos, las fibras de las raíces y polisacáridos, razón por la cual son menos estables que los micro agregados ya comentados (Kibblewhite *et al.*, 2016).

Los macro agregados, como su nombre lo indica son de mayor dimensión que los demás coloides, los cuales tienen medidas superiores a los 250  $\mu\text{m}$ , permiten darle estructura al suelo y facilitan el transporte de los fluidos a través del medio edáfico, lo que favorece a la infiltración del aire y el agua (Kuncoro *et al.*, 2014). A su vez, los suelos compactados se caracterizan por tener una mayor proporción de micro agregados y menos de los de mayor tamaño, donde polisacáridos y otros integrados amorfos son los agentes de unión o cohesión entre partículas.

De acuerdo con la propuesta de Tisdall y Oades (1982), la secuencia de ligandos entre los componentes orgánicos y minerales sigue una secuencia particular, de acuerdo con la escala a la que se observe el fenómeno de la agregación de las partículas, esto es: a nivel micro (0.003 mm) se basa en la interacción entre partículas primarias de limo, arcilla y humus, bajo el dominio de la relación humus-arcillas y arcillas por cohesión química (por ejemplo, vínculo a través de óxidos de hierro o compuestos de calcio). Después, a una escala de 0.03 mm, los sub micro agregados son partículas de minerales incrustados con residuos de tipo microbiano

o vegetales, hasta formar los micro agregados (0.3 mm), donde ya participan los pelos radiculares, las hifas, esporas y polisacáridos. Por último, ya a una escala de 3 mm, aparecen los macro agregados donde se integran las raíces y las hifas de los hongos micorrícicos que, junto con los polisacáridos, estabilizan el medio edáfico para proveer una estructura idónea para optimizar la capacidad productividad agrícola del suelo (Guo *et al.*, 2016).

La glomalina es una glucoproteína producida en hifas y esporas de micorrizas del tipo arbuscular que habitan en el suelo y en las raíces de las plantas. Esta sustancia actúa como un adherente entre las partículas minerales y las mantiene unidas para formar micro agregados, los cuales como ya se mencionó, se juntan para dar lugar a los macro agregados. Lo anterior se lleva a cabo por la acción de la glomalina, la cual primero recubre las raíces de las plantas y después se va expandiendo hasta abarcar la vecindad de las partículas del suelo. Al respecto, las raíces de los cultivos de ciclo corto, conocidos como “anuales”, se mantienen activas sólo un tercio del tiempo, pero en el caso de los de cobertura, permiten que las raíces se mantengan vivas y activas hasta en 90% del tiempo. Esto es relevante porque cuando están activas producen más amino-polisacáridos, lo que favorece a su vez la elaboración de glomalina por parte de las micorrizas, ya que se propicia un suministro estable de alimentos (Shah, *et al.*, 2017).

De acuerdo con Gusli *et al* (2020), la influencia del sistema radical de las especies presentes en el suelo, contribuyen de manera importante con la estabilidad del medio edáfico, donde dicho amino-polisacárido o glicoproteína tiene su origen en la combinación de una proteína de la micorriza con los azúcares que exudan las raíces de las plantas, mismas que a su vez crean otros exudados de polisacáridos, recubriendo a las partículas del suelo. Por lo tanto, la red que forman las hifas en el suelo, permite mantener intactos los agregados, porque impide que los materiales orgánicos queden a merced de la acción de la biomasa microbiana, razón por la cual no pueden ser descompuestos e incrementa el tiempo de permanencia de los agregados (Gossen *et al.*, 2016).

La forma en que influyen las micorrizas sobre el proceso de agregación de las partículas del suelo se debe a que sus hifas forman una especie de madeja con los minerales del medio edáfico, lo que propicia su organización y quedar enlazados entre sí. A través de la acción de este tipo de hongos, se crea una especie de barrera que fomenta la protección física de los enlaces entre las arcillas y los materiales de desecho orgánico que forman los micro agregados (Zang *et al.*, 2017).

De acuerdo con Abdi *et al.*, (2018), las raíces de las plantas y las hifas son las que forman a estos empaquetamientos, con la glomalina como mecanismo de unión, creando una especie de reacción en cadena, porque estos se van uniendo a otros micro agregados para formar macro agregados y estos a su vez dan origen a otros de mayor tamaño. Por tratarse de un mecanismo simbiótico, la glomalina sólo se produce cuando las plantas y las micorrizas se interrelacionan. Esta sustancia se produce de manera continua porque es un compuesto que sirve de alimento para la biomasa microbiana edáfica. Al respecto, cabe hacer notar que las bacterias son más resistentes y de menor tamaño que los hongos, por ello, su cantidad suele ser mucho mayor que la de los hongos en los suelos agrícolas. Cuando se da este caso, se produce menos glomalina y, por ende, menor formación de macro agregados, lo cual es inherente a una estructura deficiente que propicia la compactación del suelo.

En áreas naturales no perturbadas por el humano, los hongos no requieren de la presencia de una cubierta vegetal ni tampoco de fuentes constantes de carbono. Los hongos son más longevos que las bacterias, pero son más exigentes en cuanto a la estabilidad del medio para sobrevivir en los terrenos agrícolas. Por ello, la compactación del suelo es un problema biológico, el cual está vinculado con la disminución de la cantidad de polisacáridos y glomalina presentes en el suelo, donde su compresión es atribuida a la escasez de raíces vivas y de la actividad de las micorrizas (Ishak y Brown, 2018).

Carlesso *et al* (2019) hacen énfasis en la compactación del suelo y su relación con la descomposición de los residuos orgánicos en los campos cultivados. Al respecto, como ya se mencionó, el laboreo del suelo permite romper las capas duras que se

forman a distintas profundidades del perfil, las cuales originan la compactación del medio edáfico; sin embargo, esto por ningún motivo constituye una solución que pueda darse de manera permanente. La labranza incrementa la aireación del suelo y disminuye tanto la producción de glomalina y amino-polisacáridos formados por la reducción de los exudados de raíz vegetal y las poblaciones de hongos micorrizas. Entonces, la compactación del suelo es el resultado de la falta de raíces activas que producen amino-polisacáridos y exudados radiculares, aunado a la ausencia de micorrizas que produzcan glomalina.

Bajo condiciones de suelos sin alteraciones por la agricultura, las hifas se reciclan en una semana como máximo, mientras que la glomalina se descompone y recubre constantemente las partículas del suelo. Esto tiene más relevancia sobre todo cuando se compara con suelos agrícolas, cuya cantidad de hongos y bacterias son mucho menores y, por lo mismo, predominan los micro agregados respecto a los macro agregados. La mayor capacidad de reacción de los compuestos químicos que actúan como cementantes, propician la formación de más micro agregaciones estables con un menor tamaño del espacio poroso, privilegiando la compresión del suelo. Para evitar o al menos disminuir la compactación del suelo, se requiere la presencia y mantenimiento de macro agregados, quienes son los responsables de mejorar la estructura edáfica y reducen su compactación. Por lo aquí comentado, la formación de estos compuestos órgano-minerales son consecuencia de procesos biológicos, los cuales son un componente esencial para mejorar la capacidad productiva de los suelos (Nazari *et al.*, 2020).

King, *et al.*, (2020) reafirman la importancia de la adición de materiales orgánicos al suelo cuando son sometidos a actividades agrícolas. Lo anterior se hace más evidente cuando se conjunta la humedad, aireación y laboreo del suelo, porque si dichas variables se intensifican, promoverán aún más la tasa de descomposición de los macro agregados, debido a la mineralización de los compuestos orgánicos. Si estos no se reponen cuando son oxidados, esto tendrá consecuencias negativas en la productividad agrícola, porque más de 90% del carbono en el suelo está asociado

con la fracción mineral y, por lo mismo, la falta del reciclaje orgánico contribuirá a su inexorable agotamiento, donde se genera la formación de terrenos de difícil manejo, formados principalmente de micro agregados y que impiden la libre circulación de la fase líquida y gaseosa del suelo (Enez *et al.*, 2016).

La velocidad de infiltración del agua en un suelo es atribuida esencialmente a la cantidad y distribución de los macro poros del suelo. Por lo mismo, al alterarse el vínculo entre los compuestos orgánicos y la fracción mineral del suelo, esto impedirá la conservación de macro agregados, con el consecuente incremento del riesgo de que se produzcan anegamientos de manera continua (Alaoui *et al.*, 2018).

De acuerdo con Wang *et al.*, (2020), hasta cierto punto, la superficie del suelo atenúa el impacto del tráfico de la maquinaria agrícola, donde las raíces de las plantas forman espacios vacíos que conducen a la creación de macro poros donde el aire y el agua fluyen a través del suelo, pero eso depende de su interconexión. Las raíces intercambian gases y regulan la cantidad de oxígeno del suelo, lo cual, por ser aerobia, resulta fundamental para la sobrevivencia de la biomasa microbiana. Sin embargo, el exceso de oxigenación induce una mayor tasa de mineralización de los compuestos carbonados (Shah *et al.*, 2017).

Las raíces de las plantas representan en gran medida el abasto de alimento para sostener tanto a la biomasa microbiana como a la fauna del suelo, lo cual también es básico para impedir que el suelo se compacte. En este sentido, los residuos orgánicos propician que el suelo tenga una densidad menor. De hecho, el valor de la materia orgánica es inferior a  $0.6 \text{ kg m}^{-3}$ , magnitud considerablemente menor a la que tienen los suelos minerales, la cual en términos generales es muy superior a  $1.0 \text{ kg m}^{-3}$ . Por ello, la fracción orgánica en el suelo hará que la densidad aparente del medio edáfico disminuya y con ello, se reduzca de manera considerable la problemática de la compactación de los terrenos agrícolas (Zhang *et al.*, 2017).

### III OBJETIVOS E HIPÓTESIS

#### 3.1 Objetivos

- Establecer un diagnóstico de las condiciones físicas y químicas edáficas en áreas irrigadas de la región Centro Golfo, Veracruz, con el propósito de evaluar una posible compactación de los terrenos agrícolas
- Generar indicadores de las propiedades y características edáficas, que permitan dilucidar el efecto de las prácticas agrícolas sobre la compactación del suelo

#### 3.2 Hipótesis

- La medición de la densidad aparente del suelo por sí misma, no tiene una relación significativa con las propiedades edáficas, razón por la cual no es viable considerarla como un indicador de las condiciones productivas de un suelo
- La humedad aprovechable está asociada de manera directa con la fracción mineral edáfica, cuya relación cuantitativa constituye un indicador de la modificación de la capacidad del suelo para almacenar agua

## IV MATERIALES Y MÉTODOS

### 4.1 Área de estudio

El estudio se llevó a cabo en la región hidrológica 28 de Papaloapan, Golfo Centro, entre los municipios de Tierra Blanca, Cosamaloapan y Cuautotolapan, en el estado de Veracruz, en los cuales predomina el clima cálido subhúmedo en verano, con un rango de precipitación anual entre 1400 y 2100 mm, según la posición fisiográfica a la que se haga referencia, con un rango de temperatura anual entre 24 y 26 °C.

De acuerdo a los reportes que se tienen en los medios oficiales, hay una gran diversidad de cultivos en la zona (Cuadro 4.1); sin embargo, los que en realidad predominan son básicamente los de tipo multianual (pradera y caña de azúcar) y en menor medida cereales.

Cuadro 4.1. Cultivos producidos en la zona donde se ubicó el área de estudio, la cual corresponde a la región Centro Golfo, Veracruz (Fuente: SIAP, 2019.)

Cultivo	Superficie sembrada	Rendimiento	
	(has)	(%)	(t/ha)
Sandía	1	0.0	10.0
Mango	3	0.0	15.0
Calabaza	6	0.1	5.8
Frijol (alubia)	17	0.2	1.8
Limón	24	0.2	15.8
Hortalizas	26	0.2	15.8
Sorgo forrajero	43	0.4	32.0
Toronja	69	0.6	30.0
Otros cultivos	99	0.9	63.1
Pepino	126	1.1	28.0
<b>Arroz</b>	<b>1,501</b>	<b>13.7</b>	<b>8.7</b>
<b>Maíz (grano)</b>	<b>1,724</b>	<b>15.7</b>	<b>11.7</b>
<b>Caña de azúcar</b>	<b>2,495</b>	<b>22.7</b>	<b>87.6</b>
<b>Zacate estrella</b>	<b>4,855</b>	<b>44.2</b>	<b>30.7</b>
Total	10,989	100.0	----

En seguimiento a lo anterior, desde el punto de vista de la superficie que abarcan los diferentes cultivos en la zona resaltan el arroz, maíz, caña de azúcar y pasto o zacate estrella, que en conjunto cubren 96.3% en la región Centro Golfo, Veracruz.

La correcta y oportuna aplicación del manejo agrícola es una práctica que brinda una mejor expectativa sobre la calidad y cantidad de los productos a cosechar, pero si no se realiza eficientemente afectará de manera negativa a la producción e ingresos del productor. Para que el manejo tenga el efecto esperado, debe contarse con una estrategia que detecte y delimite las variables que afecten al cultivo (condiciones extremas de acidez o alcalinidad, presencia tóxica de sales solubles u otros elementos químicos, compactación del terreno, áreas con drenaje impedido, entre otros) y proponer, en su caso, alternativas de solución.

El estudio se llevó a cabo únicamente en terrenos agrícolas irrigados ubicados en la región Centro Golfo, Veracruz, en la que se abarcó una superficie de alrededor de 11 mil hectáreas. Las acciones que se realizaron se citan a continuación:

- Recopilación de información relevante que compete a las condiciones edáficas y climáticas de la región Centro Golfo, Veracruz, para planear la ubicación de los sitios de colecta de muestras de suelo
- Colecta de 140 muestras de suelo a razón de una submuestra de suelo cada dos hectáreas y una muestra compuesta abarcando cinco hectáreas con condiciones razonablemente homogéneas
- Las muestras de suelo se llevaron al Laboratorio del Departamento de Irrigación de la Universidad Autónoma Chapingo, en donde se realizaron las actividades que a continuación se mencionan:
  - Preparación (secado, molienda, tamizado y almacenamiento)
  - Determinación de conductividad eléctrica medida en el extracto de la pasta saturada
  - Materia orgánica total

- Sumatoria de bases intercambiables (Ca, Mg, K y Na) extraídas en acetato de amonio 1N y cuantificadas por espectrofotometría.
  - Proporción de arenas, limos y arcillas, así como la definición de la clase textural
  - Determinación de constantes de humedad: capacidad de campo, punto de marchitez permanente.
- A partir de los resultados obtenidos en el laboratorio, de recorridos en campo y observaciones en el terreno, se hizo la reconversión de variables y se generaron los indicadores para los propósitos del presente estudio.

Todas las variables consideradas en el manejo forman parte de los “factores agronómicos” y para delimitar los efectos negativos que causan los diversos fenómenos sobre el crecimiento y/o desarrollo de los cultivos, se agrupan según el tipo de desorden que inducen en la planta. Aunque esto pudiese ser obvio hasta cierto punto, su diferenciación evita confundir los efectos que ejercen las distintas variables sobre la productividad y rentabilidad del sistema agrícola, además de estar en condiciones de proponer las alternativas más convenientes que resuelvan una problemática concreta.

Las propiedades y características químicas y físicas del suelo, así como sus condiciones climáticas, son variables que, al rebasar ciertos límites en magnitud y duración, afectan el crecimiento de los cultivos. Por ello, se hizo una evaluación de las condiciones edafoclimática para que, en la medida de lo posible, se tengan los elementos que coadyuven a superar algunos problemas a través de la aplicación de enmiendas al suelo o cambiando el manejo.

## 4.2 Condiciones climáticas en el área de estudio

Las variables climáticas que se evaluaron fueron evaporación total mensual, precipitación pluvial total mensual, porcentaje de días con granizo al mes, temperatura promedio mínima mensual y temperatura promedio máxima mensual, las cuales se colectaron de los reportes de las estaciones climáticas ubicadas en el área de influencia de la zona agrícola de la región Centro Golfo, Veracruz, de acuerdo con lo reportado en el Servicio Meteorológico Nacional.

Aunque la zona de estudio es evidentemente de riego, la disponibilidad de agua no deja de ser muy importante, puesto que los períodos de déficit o exceso, alteran significativamente el rendimiento del cultivo. A su vez, la temperatura influye sobre la tasa fotosintética y por ende en la cantidad y calidad de la producción. En la Figura 4.1 se presenta la fluctuación promedio de la evaporación y precipitación pluvial total mensual de la región Centro Golfo, Veracruz.

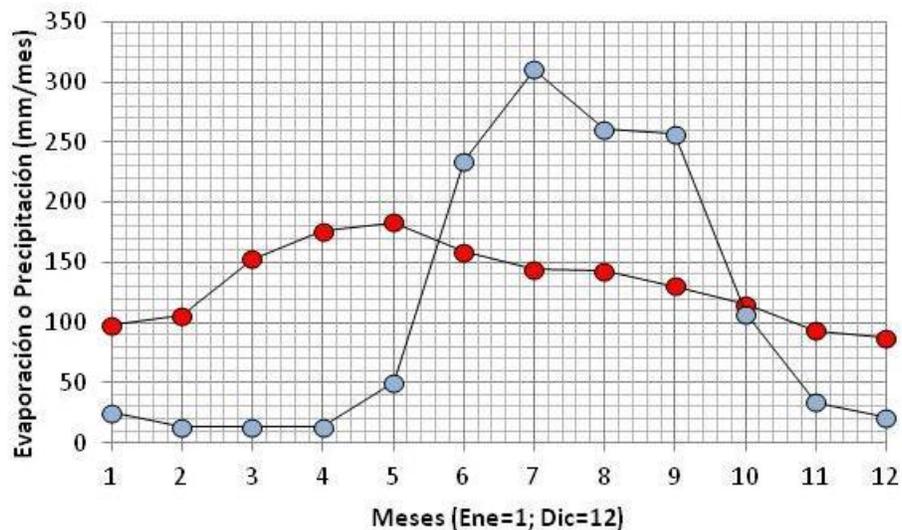


Figura 4.1. Relación de la variación total mensual de la evaporación respecto a la precipitación pluvial en el área agrícola de la región Centro Golfo, Veracruz.

De acuerdo con la información climática que se recabó y analizó, el período o estación de crecimiento efectivo por humedad se distribuye básicamente en cuatro

meses durante el año (junio a septiembre), por lo que el estiaje es más prolongado con ocho meses, abarcando de octubre a mayo, de ahí que las labores tendientes a la conservación del agua son fundamentales para que sea viable mejorar y conservar la productividad agrícola.

Otra forma de precipitación, pero en forma sólida es el granizo, el cual está compuesto de grumos irregulares de hielo duro de diverso diámetro. Su presencia está asociada a tormentas producidas en nubes de tipo cumulonimbos, cuya manifestación puede dañar de manera severa a la producción. En la Figura 4.2 se presenta la tendencia promedio del porcentaje de días al mes en que es viable que ocurran granizadas en la región Centro Golfo, Veracruz.

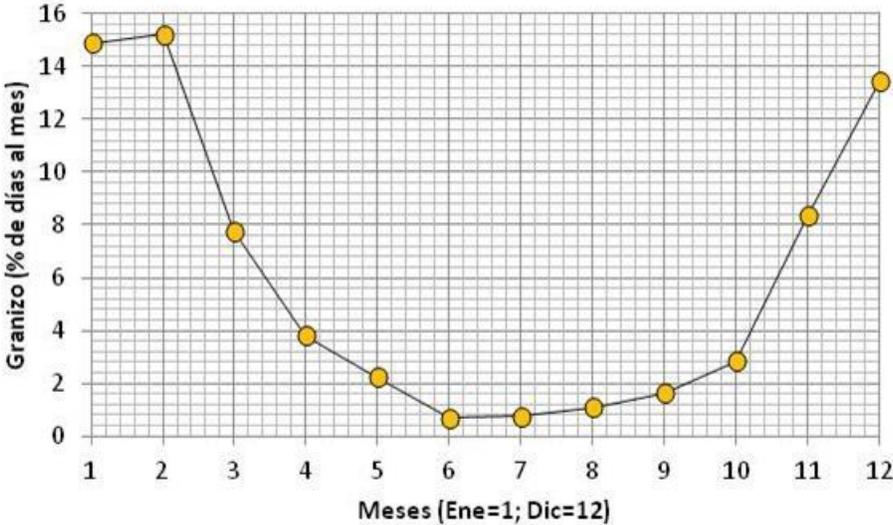


Figura 4.2. Distribución del porcentaje de días con granizo al mes en el área agrícola de la región Centro Golfo, Veracruz.

Durante la época invernal es cuando hay mayor probabilidad de que ocurran granizadas en la zona de estudio, sobre todo entre diciembre y marzo, lo cual es posible que afecte a los segundos cultivos, establecidos en el ciclo otoño-invierno.

En la Figura 4.3 se presenta la variación de la temperatura promedio mensual mínima y máxima que se reporta para la región Centro Golfo, Veracruz.

Entre los cultivos que son más sensibles a la condición térmica está la caña de azúcar ya que depende de la tasa fotosintética para la formación de sacarosa, cuya temperatura óptima en la hoja es alrededor de 34°C, pero como intercepta de manera directa la radiación solar, este valor es mayor a la que se registra como temperatura del aire. Por ello, se fija entre 26°C y 30°C como rango óptimo para el crecimiento de la caña. Si durante cierta época del año la temperatura media es menor a 21°C, se retarda el crecimiento de los tallos y aumenta la concentración de sacarosa, lo cual también ocurre si la oscilación entre las temperaturas medias diurnas y nocturnas es mayor a 8°C, siempre y cuando no se presenten factores que limiten el rendimiento.

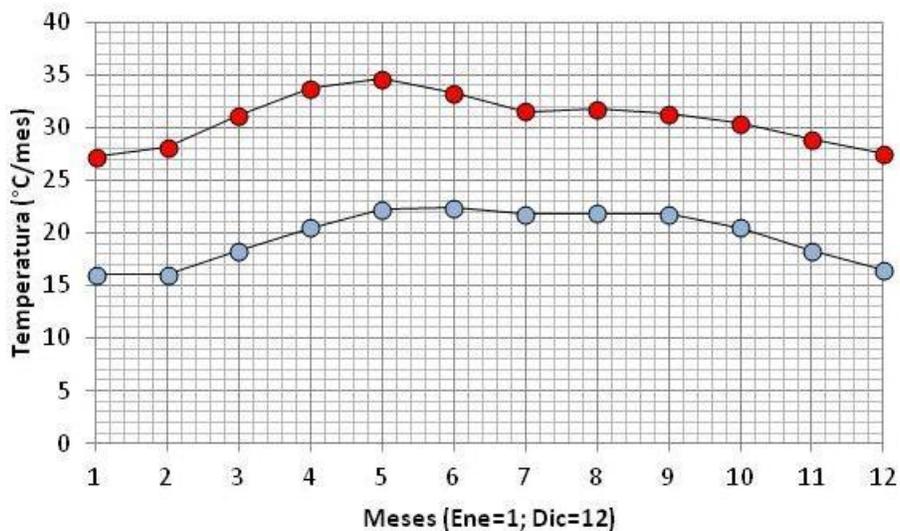


Figura 4.3. Variación de la temperatura promedio mensual mínima y máxima que se reporta en las estaciones climáticas ubicadas en el área agrícola de la región Centro Golfo, Veracruz.

La temperatura promedio anual (22.6°C) no representa un factor de riesgo que pudiese alterar de manera negativa la productividad agrícola, incluso su oscilación

térmica extrema fluctúa entre 9.6°C y 13.2°C, por lo que no representa amenaza alguna para una apropiada tasa fotosintética, aunque también ésta es función de la velocidad del viento, la conductancia estomática, la intensidad de la luz y de las condiciones hídricas en el sistema suelo-planta-atmósfera.

### 4.3 Procedimientos para analizar el suelo del área de estudio

#### 4.3.1 Colecta y procesamiento de las muestras de suelo

El procedimiento para colectar las muestras de suelo se basó en la Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000, donde se establecen las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos.

Para colectar las muestras de suelo se empleó una pala recta limpia y libre de cualquier tipo de sustancia que pudiese contaminarlas, como presencia de óxidos, residuos de agroquímicos o fertilizantes, materia orgánica, suelo de otros terrenos, entre otros.

Previo a la toma de la muestra se raspó la superficie del terreno para quitar el material vegetal, piedras o terrones. Se hizo un hoyo de tal manera de asegurar meter la pala al suelo perpendicularmente a la superficie del terreno y así colectar la muestra. Se tomó una cara del hoyo realizado y se colocó en una bolsa de plástico lo suficientemente grande para que cupiera el suelo de manera holgada (al tomar una submuestra se recuperó sólo la parte central del suelo, desechando los laterales). Esto se repitió cinco veces cada 15 hectáreas, para abarcar una superficie de alrededor de 80 hectáreas por muestra, de tal manera que su distribución espacial fuese razonablemente homogénea en toda la zona de estudio. Para ello, se trazaron cuadrantes con un espaciamiento lo más equidistante posible entre cada sitio de muestreo.

La cantidad de muestra compuesta en total que se recuperó por muestra compuesta tuvo un peso aproximado de 1.5 kilogramos de suelo húmedo, cantidad suficiente para realizar los análisis que se llevaron a cabo las variables en estudio. Se hizo

énfasis en la identificación plena de cada muestra colectada, escribiendo en la bolsa su código correspondiente con un marcador de tinta indeleble y se introdujo en el interior de la bolsa una etiqueta con el mismo código.

Se procuró no colectar muestras en los siguientes casos: a) manejo reciente (mes o mes y medio a la fecha del muestreo) para sortear efectos de contaminación de la muestra por adición de agroquímicos y fertilizantes; b) donde fue muy evidente la presencia de agroquímicos o fertilizantes aplicados al suelo en días previos a la fecha del muestreo; c) que la condición del sitio fuese totalmente distinta a lo que se aprecia en el terreno (por ejemplo al lado de un galpón, corrales, viviendas, caminos, excretas de animales, entre otros aspectos).

Las muestras de suelo colectadas se transportaron al Laboratorio del Departamento de Irrigación de la Universidad Autónoma Chapingo, donde se secaron al aire y a la sombra. Una vez deshidratadas, se molieron con mazos de madera hasta pasar el material a través de un tamiz de 2 mm de abertura.

#### 4.3.2 Análisis de las condiciones físicas y químicas edáficas de la zona de estudio

Los análisis químicos y físicos de cada una de las muestras de suelo colectadas se efectuaron en el Laboratorio del Departamento de Irrigación de la Universidad Autónoma Chapingo. Para ello se siguió la Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000 en la que se establecen las especificaciones para estudios, muestreo y análisis de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, con los procedimientos y determinaciones que se mencionan en el Cuadro 4.2.

Cuadro 4.2. Metodología indicada en la Norma Oficial Mexicana NOM-021-REC NAT-2000 por cada variable en estudio.

<b>Parámetro</b>	<b>Clave</b>	<b>Procedimiento</b>
Preparación de la muestra	AS-01	Secado a la sombra, molido y tamizado a 2 mm
Densidad aparente del suelo (Dap)	AS-03	Método del terrón parafinado
Capacidad de campo (C <sub>c</sub> )	AS-06	Ecuación del Palacios a 33 kPa
Punto de marchitez permanente (P <sub>MP</sub> )	AS-06	Ecuación del Palacios a 1500 kPa
Materia orgánica (M <sub>o</sub> )	AS-07	Método de Walkley y Black.
Textura del suelo (incluye análisis de arena, limo, arcilla y clasificación textural)	AS-09	Hidrómetro de Bouyoucos
Suma de bases intercambiables (ΣB)	AS-13	Extracción por acetato de amonio pH 7 1N
//Obtención del extracto de saturación	AS-16	Succión de vacío de la pasta de saturación.
Conductividad eléctrica (C <sub>E</sub> )	AS-18	Conductímetro (extracto de la pasta de saturación)

#### *Preparación de la muestra*

Consiste en secar a la sombra las muestras de suelo, extendiéndolas en superficies no contaminantes (charolas de plástico, vidrio, etc.) a temperatura ambiente (35°C y humedad relativa entre 30 y 70%). Moler utilizando un mazo de madera y posteriormente pasar sobre un tamiz de dos mm de diámetro. Al ser tamizado el suelo, separar 1.5 kg de la muestra, las cuales se introducen en una bolsa de

polietileno haciéndose girar en todas direcciones para obtener la muestra homogeneizada. Por último pesar las submuestras que se requieran y guardarlas en contenedores herméticos de vidrio o plástico.

#### *Densidad aparente del suelo ( $D_{ap}$ )*

Este método consiste en la selección de dos o tres terrones de aproximadamente dos cm de diámetro de la muestra de suelo, se secan en la estufa a 105°C hasta peso constante. Posteriormente tomar un terrón atándole a un hilo, colocando el otro extremo del hilo en el brazo del platillo de la balanza. Después sumergir el terrón en la parafina derretida, hasta quedar totalmente cubierto, se pesa el terrón en el aire. A continuación tomar el terrón parafinado sumergiéndolo en agua, y registrar únicamente el peso del terrón. Inmediatamente de obtener los datos se prosigue con los cálculos y se comparan los resultados con la tabla interpretación de los resultados.

#### *Capacidad de campo y punto de marchitez permanente*

Radica en el empleo de la saturación de 25 g de suelo (seco y tamizado) con agua destilada a través de un plato o membrana. Pasado el tiempo de saturación (16 horas) eliminar el exceso de agua, introduciendo las muestras a una olla de presión. La presión aplicada para el caso de la olla es de 30 kPa, la cual permite obtener el contenido de humedad a capacidad de campo (cc), en el caso de la membrana es de 1 500 kPa para obtener el contenido de humedad a punto de marchitez permanente (pmp). Mantener la presión hasta obtener el equilibrio. Siguiendo el procedimiento sacar las muestras y obtener su peso en húmedo, secar dentro de la estufa (hasta peso constante) obteniendo el peso del suelo seco. Al terminar aplicar las ecuaciones que se mencionan a continuación.

$$\theta g = \frac{(P_{sh} - P_{ss})}{P_{ss}} * 100$$

Donde:

$\theta g$  = Contenido de humedad a cc o pmp.

Psh = Peso del suelo húmedo.

Pss = Peso del suelo seco

Posteriormente con estos datos y aplicando la ecuación del Palacios (1963) se encuentra los contenidos de humedad a la presión de 30 kPa y 1500 kPa.

$$\text{Log } \theta g = \frac{(K - \log(T - C))}{n}$$

Donde:

$\theta g$  = humedad en porcentaje

T = presión elegida

C = constante

n = parámetros de regresión que dependen de la textura del suelo.

K = parámetros de regresión que dependen de la textura del suelo.

### *Materia orgánica*

La determinación de materia orgánica del suelo se evalúa a través del contenido de carbono orgánico con el método de Walkley y Black. Este método se basa en la oxidación del carbono orgánico del suelo por medio de una disolución de dicromato de potasio y el calor de reacción que se genera al mezclarla con ácido sulfúrico concentrado. Después de un cierto tiempo de espera, la mezcla se diluye, se adiciona ácido fosfórico para evitar interferencias de  $\text{Fe}^{3+}$  y el dicromato de potasio residual es valorado con sulfato ferroso. Con este procedimiento se detecta entre un 70 y 84% del carbón orgánico total por lo que es necesario introducir un factor de corrección, el cual puede variar entre suelo y suelo. En los suelos de México se recomienda utilizar el factor 1.298 (1/0.77).

### *Textura del suelo*

En el presente método se elimina la agregación debida a materia orgánica y la floculación que corresponde a los cationes calcio y magnesio. No se eliminan otros cementantes como carbonatos. El tiempo de lectura es 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 y se han usado para construir el triángulo de texturas.

#### *Suma de bases intercambiables*

El método para la determinación consiste en la saturación de la superficie de intercambio con un catión índice, el ion amonio; lavado del exceso de saturante con alcohol; desplazamiento del catión índice con potasio y determinación del amonio mediante destilación. El amonio se emplea como catión índice debido a su fácil determinación, poca presencia en los suelos y porque no precipita al entrar en contacto con el suelo. La concentración normal que se usa asegura una completa saturación de la superficie de intercambio y como está amortiguada a pH 7.0, se logra mantener un cierto valor de pH. El lavado con alcohol pretende desplazar el exceso de saturante y minimizar la pérdida del amonio adsorbido.

#### *Obtención del extracto de saturación*

Este método consiste obtener el extracto acuoso por filtración al vacío de una pasta del suelo saturado hecha con agua destilada. El extracto de saturación es una solución acuosa importante porque muchas propiedades del suelo como la composición de las sales solubles y la conductividad eléctrica del extracto de saturación están relacionadas con la respuesta de los cultivos a la salinidad.

#### *Conductividad eléctrica*

Este método reside en la medición de la corriente que fluye entre dos placas (electrodos) al aplicarle un potencial o voltaje, las cuales son introducidas en el extracto de saturación de la muestra de suelo.

### 4.3.3 Generación de los indicadores y reconversión de variables

La obtención de indicadores y reconversión de variables de los parámetros que se analizaron en las muestras de suelo, tuvo como propósito entender qué tipo de vínculo existen entre los resultados obtenidos en el laboratorio de las diferentes propiedades y características del medio edáfico analizadas, así como permitir su evaluación estadística para generar grupos de acuerdo a su similitud. De acuerdo con lo anterior, entre la reconversión de algunas variables e indicadores, se crearon nueve variables diferentes. A continuación, se presenta el procedimiento que se siguió para cada caso.

- *Indicador del grupo textural ( $T_{EXT}$ )*

Se asignó una numeración progresiva a cada grupo textural que se detectó en los suelos analizados en la zona de estudio. Esta información se presenta en el Cuadro 4.3.

Cuadro 4.3. Índice que se empleó para identificar cada uno de los grupos texturales detectados en las muestras analizadas colectadas en la región Centro Golfo, Veracruz.

<b>Grupo Textural</b>	<b><math>T_{EXT}</math></b>
Franco-arenosa	1
Franco-arcillo-arenosa	2
Franca	3
Franco-arcillosa	4
Arcillosa	5

La generación de este indicador ( $T_{EXT}$ ), tuvo como propósito poder agrupar las distintas muestras con base en este criterio, para así tener la capacidad de analizar estadísticamente una variable cualitativa.

- *Indicador de la proporción del tamaño de partícula ( $I_{TP}$ )*

De acuerdo al ámbito de exploración observado en los diferentes componentes de la textura de los suelos, los que tuvieron mayor variación fueron la fracción arcillosa ( $A_C$ ) y la arenosa ( $A_E$ ), no así los limos. Por lo anterior, se trabajó sólo con ambas y, para ello, se hizo una división entre la concentración de ambos tamaños, a cuyo cociente se le nombró como indicador de la proporción del tamaño de partícula ( $I_{TP}$ ) y, dado el manejo que se le dio a las variables involucradas, el indicador es adimensional. Se empleó en este estudio con la idea de generar otras variables, mismas que a continuación se describen.

- *Estimador de la arcilla ( $E_{AC}$ )*

Con el propósito de evaluar la calidad de la estimación del indicador de la proporción del tamaño de partícula ( $I_{TP}$ ), se empleó nuevamente dicha variable, pero ahora como estimador de la arcilla ( $E_{AC}$ ), generando la siguiente ecuación:

$$E_{AC}: \quad I_{TP} = \alpha(A_C)^\beta$$

De acuerdo con la ecuación anterior, el indicador de la proporción del tamaño de partícula ( $I_{TP}$ ) se tomó como variable dependiente y la arcilla ( $A_C$ ) como variable independiente, donde  $\alpha$  y  $\beta$  son los parámetros de la ecuación, cuyo valor depende de la distribución de los puntos experimentales. Las unidades de esta nueva variable están en términos porcentuales.

- *Estimador de la densidad aparente ( $E_{Dap}$ )*

La densidad aparente ( $D_{ap}$ ) es la medición de una característica del suelo y, como tal, muy vulnerable al efecto de diferentes circunstancias, como son el

paso de la maquinaria, el ganado, incluso el crecimiento de las raíces. Por ello, se decidió estimar la  $D_{ap}$ , de acuerdo con lo que podría considerarse como su valor teórico, según la textura de los suelos, creando así el indicador ( $E_{Dap}$ ) con base en la siguiente ecuación:

$$E_{Dap} = \alpha + \beta \ln (I_{TP})$$

La relación cuantitativa en comento es de tipo logarítmica, donde  $E_{Dap}$  es la variable dependiente (expresada en  $g\ cm^{-3}$ ) y el cociente entre los tamaños de partícula (adimensional), aquí denominado como indicador de la proporción del tamaño de partícula ( $I_{TP}$ ), como variable independiente.  $\alpha$  y  $\beta$  son los parámetros de la ecuación, cuyo valor depende de la distribución de los puntos experimentales.

- *Codificación para la clasificación por densidad aparente ( $A_{Dap}$ )*

La densidad aparente es una de las variables que con mayor frecuencia se elige para identificar problemas de compactación de los suelos. Por tal razón, en este estudio se hizo énfasis en intentar emplearla con dicho propósito. Con ello en mente, una vez generada la variable  $E_{Dap}$ , ahora se procedió de la siguiente manera:

- a) El indicador  $I_{Dap}$  es el cociente de la división del valor de la densidad aparente ( $D_{ap}$ ) que se midió en cada muestra de suelo entre el resultado de su estimación ( $E_{Dap}$ )

$$I_{Dap} = D_{ap}/E_{Dap}$$

Por la forma de la expresión matemática en comento, las unidades del indicador  $I_{Dap}$  generado, adquieren las mismas que se tienen para la densidad aparente ( $g\ cm^{-3}$ ).

- b) La codificación para la clasificación de la densidad aparente ( $A_{Dap}$ ) se obtuvo a través de la asignación de un número consecutivo, de acuerdo

al valor obtenido con el indicador previo ( $I_{Dap}$ ), el cual se reporta en el Cuadro 4.4

Cuadro 4.4. Código asignado por densidad aparente ( $A_{Dap}$ ) a las muestras que se analizaron de la región Centro Golfo, Veracruz, de acuerdo con el indicador de su densidad aparente ( $I_{Dap}$ )

$A_{Dap}$	Mínimo	$I_{Dap}$	Máximo
	$g\ cm^{-3}$		$g\ cm^{-3}$
1	---		<0.89
2	0.90		0.95
3	0.96		1.00
4	1.01		1.05
5	1.06		1.10
6	1.11		1.15
7	1.16		1.20
8	>1.21		---

La generación del indicador  $A_{Dap}$  tuvo como propósito agrupar las muestras de acuerdo con el criterio de la densidad aparente, para así tener la capacidad de analizar estadísticamente esta variable.

- *Cálculo de la humedad aprovechable ( $H_A$ )*

La humedad aprovechable ( $H_A$ ) es el resultado de la diferencia de la capacidad de campo ( $C_C$ ) y el punto de marchitez permanente ( $P_{MP}$ ), obtenidos ambos en

el laboratorio, al analizar cada una de las muestras colectadas en la zona de estudio. La ecuación es la siguiente

$$H_A = C_C - P_{MP}$$

Las variables independientes son las constantes hídricas, ambas expresadas en términos porcentuales. Por lo anterior, el valor de  $H_A$  también está en porcentaje de humedad.

- *Indicador de la capacidad de campo ( $C_{Ce}$ )*

Se estimó con base en la relación cuantitativa del índice textural ( $I_{TP}$ ) como variable independiente y la capacidad de campo medida en el laboratorio ( $C_C$ ) como variable dependiente

$$C_{Ce}: \quad C_C = \alpha(I_{TP})^\beta$$

De acuerdo con la ecuación anterior, el indicador de la proporción del tamaño de partícula ( $I_{TP}$ ) se tomó como variable independiente (expresado en términos decimales) y la capacidad de campo medida ( $C_C$ ) como variable dependiente, en unidades decimales. En la ecuación resultante,  $\alpha$  y  $\beta$  son los parámetros, los que adquieren su valor según la distribución de los puntos experimentales. Las unidades de esta nueva variable están en unidades decimales.

- *Indicador del punto de marchitez permanente ( $P_{MPe}$ )*

Al igual que el caso previo, esta constante hídrica se estimó con base en la relación cuantitativa del índice textural ( $I_{TP}$ ) como variable independiente, pero ahora la variable dependiente fue el punto de marchitez permanente que se midió en el laboratorio ( $P_{MP}$ ):

$$P_{MPe}: \quad P_{MP} = \alpha(I_{TP})^\beta$$

El indicador de la proporción del tamaño de partícula ( $I_{TP}$ ) se tomó como variable independiente y la medición del punto de marchitez permanente ( $P_{MP}$ ) como la variable dependiente, ambas expresadas en unidades decimales. En la ecuación  $\alpha$  y  $\beta$  son los parámetros, que son función de cómo se hayan distribuido los puntos experimentales. Las unidades de esta nueva variable están en unidades decimales.

- *Estimación de la humedad aprovechable ( $H_{Ae}$ )*

La humedad aprovechable estimada, se calculó con base en la diferencia entre la capacidad de campo estimada ( $C_{Ce}$ ) y el punto de marchitez permanente que también se estimó ( $P_{MPe}$ ). La ecuación es la siguiente:

$$H_{Ae} = C_{Ce} - P_{MPe}$$

Las variables independientes son las constantes hídricas que se estimaron, ambas expresadas en términos porcentuales. Por lo anterior, el valor de  $H_{Ae}$  también está en porcentaje de humedad.

#### 4.4 Análisis estadísticos

Se comparó los promedios obtenidos mediante la suma de los valores de sus repeticiones para cada parámetro, dividido entre su número de repeticiones; de las variables dependientes contra las variables independientes por tipo de clase textural (arcillosa, franco-arcillosa, franco arcillo arenosa, franco-arenosa, y franco).

Se realizó el anova y verificación de supuestos para cada una de las variables analizadas, mediante la herramienta SAS estudio.

Se llevó a cabo un análisis de frecuencia para examinar la diferencia que existió entre las variables, utilizando el programa R.

Se ejecutó un análisis mediante la prueba de T test (LSD) entre las variables independientes y las variables dependientes. El análisis se realizó con el software SAS estudio.

Se realizó un análisis estadístico entre las variables independientes y las variables dependientes. El análisis se llevó a cabo introduciendo los valores de las variables en una matriz, obteniendo una matriz de correlación entre el indicador del grupo textural y las distintas variables medidas.

Se realizó un análisis de regresión lineal para las variables analizadas en contraste con textura, índice del tamaño de partícula y coeficiente de densidad

Para la comparación de medias se realizó la prueba de Tukey con un  $\alpha=0.05$ , mediante la herramienta SAS estudio.

## V RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 5.1 Influencia de las condiciones físicas y químicas de los suelos, sobre la compactación del medio edáfico

Los suelos en la zona de estudio son de diverso origen, lo cual coincide con el amplio ámbito de observación en las diferentes condiciones físicas y químicas que se evaluaron. Para entender la problemática que se presenta, se realizaron diversos análisis en el laboratorio a las 140 muestras que se colectaron en la región y los resultados se reportan en el Cuadro 5.1.

Cuadro 5.1. Valores estadísticos ( $V_E$ ) de las variables analizadas a las 140 muestras de suelo colectadas en el área de estudio.

$V_E$	$I_{TP}$	$A_R$	$L_M$	$A_C$	$\Sigma B$	$M_O$	$D_{ap}$	$C_E$	$C_C$	$P_{MP}$	$H_A$
		%	%	%	cMol kg <sup>-1</sup>	%	g cm <sup>-3</sup>	dS m <sup>-1</sup>	%	%	%
$M_N$	0.1	8	22	14	14.3	1.1	1.15	0.4	22	11	10
$M_X$	4.4	62	42	64	47.4	3.5	1.36	3.4	57	37	29
$M_D$	1.0	30	31	39	27.1	2.0	1.27	1.2	37	20	18
$D_E$	0.7	11	4	10	6.7	0.4	0.05	0.5	6	4	4

$M_N$ =mínimo;  $M_D$ =media;  $M_A$ =máximo;  $D_E$ =desviación estándar;  $I_{TP}$ =proporción del tamaño de partícula (adimensional);  $A_R$ =arena;  $L_M$ =limo;  $A_C$ =arcilla;  $D_{ap}$ =densidad aparente;  $M_O$ =materia orgánica;  $\Sigma B$ = suma de bases intercambiables;  $C_E$ = conductividad eléctrica;  $C_C$ = capacidad de campo;  $P_{MP}$ = punto de marchitez permanente;  $H_A$ = humedad aprovechable

De los contenidos de arena, limo y arcilla, aparentemente hubo una distribución similar entre la fracción arcillosa y la arenosa pues, lo cual coincide con el valor medio del indicador elegido para cuantificar la proporción entre ambas ( $I_{TP}=1.0\pm 0.7$ ); sin embargo, esto ya no se aprecia así al considerar la clasificación por grupos texturales (Figura 5.1). En la figura en discusión se hace evidente que el grupo

textural mayoritario es el arcilloso con 57% de las muestras analizadas ubicadas en esa clasificación y 27% en franco-arcillosos. Por lo tanto, en 84% de los suelos abunda la fracción fina. En vista de lo anterior y para tener una mejor idea de cómo se distribuyen el tamaño de las tres fracciones minerales que componen los suelos, se hizo su correspondiente distribución de frecuencia (Figura 5.2).

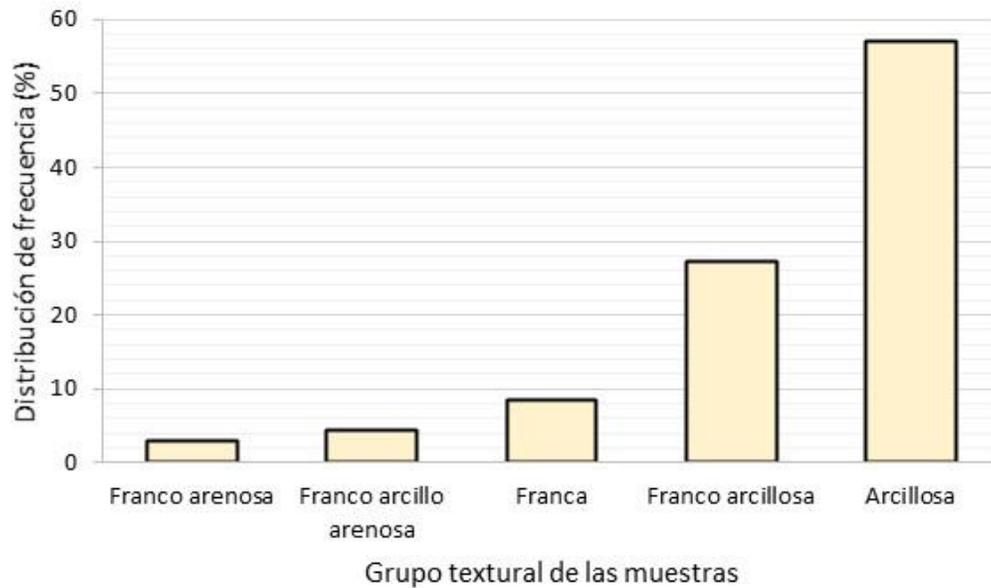


Figura 5.1. Tendencia entre los grupos texturales del suelo en los suelos colectados en el área agrícola de la región Centro Golfo, Veracruz.

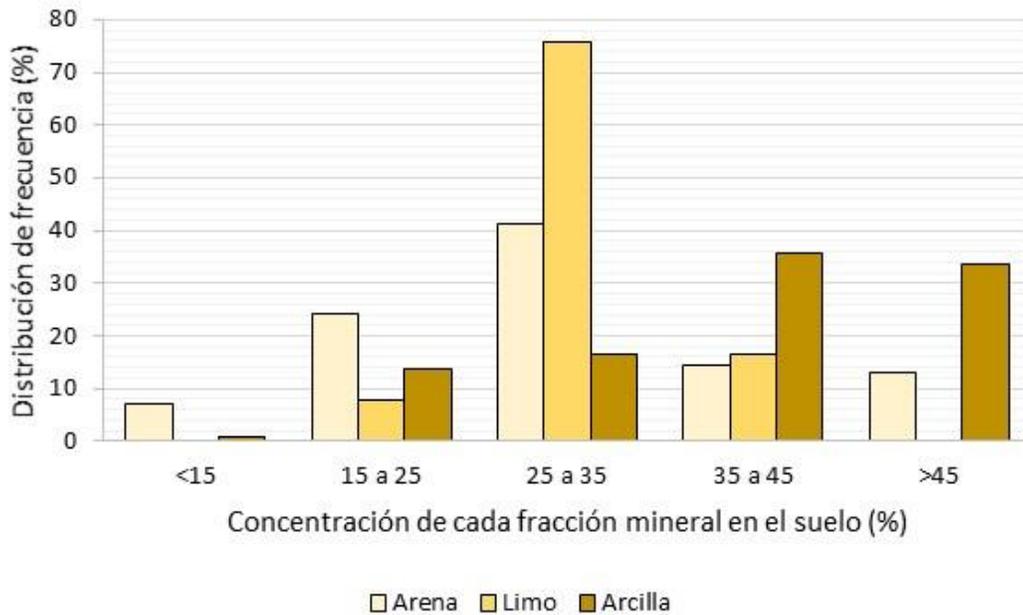


Figura 5.2. Distribución de frecuencia por tamaño de partícula en los suelos colectados en el área agrícola de la región Centro Golfo, Veracruz

Estos resultados se asemejan a los reportados por Madero *et al.*, (2011), donde sus contenidos de arcilla fueron entre 30-35%. García *et al.*, (2010) reportó una composición mecánica para arena de 13%, limo 23% y arcilla 64%, el cual a comparación de los antes mencionados la arcilla se muestra predominante. Pero en este último por su porcentaje de arcilla, es más factible que presente compactación (Figura 5.3).

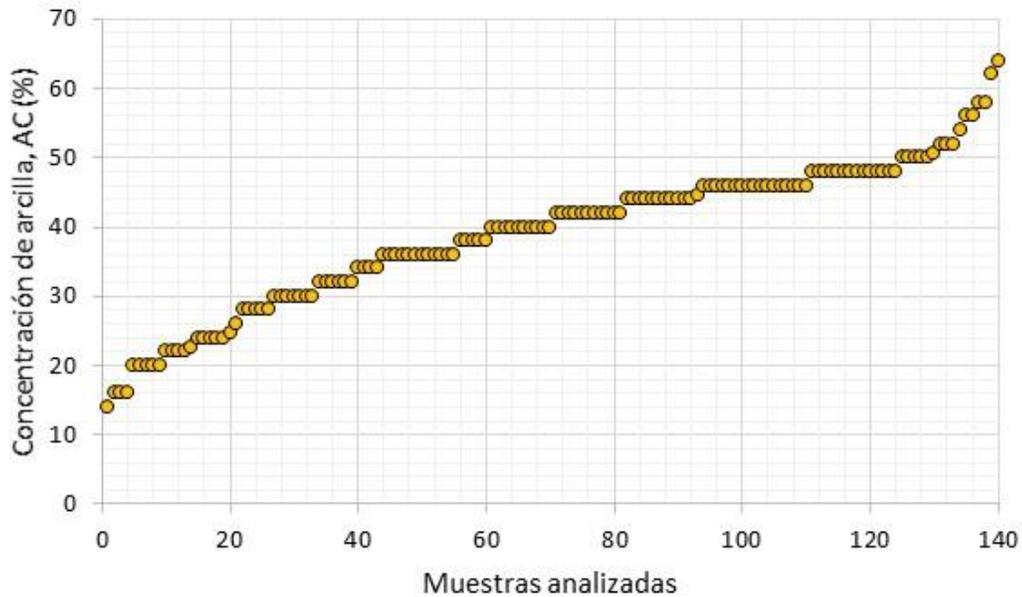


Figura 5.3. Contenido de arcilla detectada en las muestras de suelo colectadas en el área agrícola de la región Centro Golfo, Veracruz.

Mientras más arcilloso sea un terreno, mayor cantidad de cationes adsorberá y viceversa, aunque cabe hacer la aclaración que a medida que esté menos saturado el complejo arcilloso, es posible que se acrecienten desórdenes de tipo nutrimental y haya menor eficiencia de aprovechamiento de los fertilizantes.

La sumatoria de bases es una propiedad que se refiere a la suma de las llamadas bases intercambiables, a la cual se le atribuye la capacidad de neutralizar la acidez del suelo. Está constituida por los cationes calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ), magnesio ( $\text{Mg}^{2+}$ ), potasio ( $\text{K}^+$ ) y sodio ( $\text{Na}^+$ ) por ser las especies predominantes en el complejo de intercambio. Desde el punto de vista de la fertilidad edáfica, se suele asociar un valor alto de dicha variable con un suelo fértil, pero esto es consecuencia del vínculo que se tiene con la fracción arcillosa. La variación de la suma de bases que se detectó en las muestras evaluadas se muestra en la Figura 5.4.

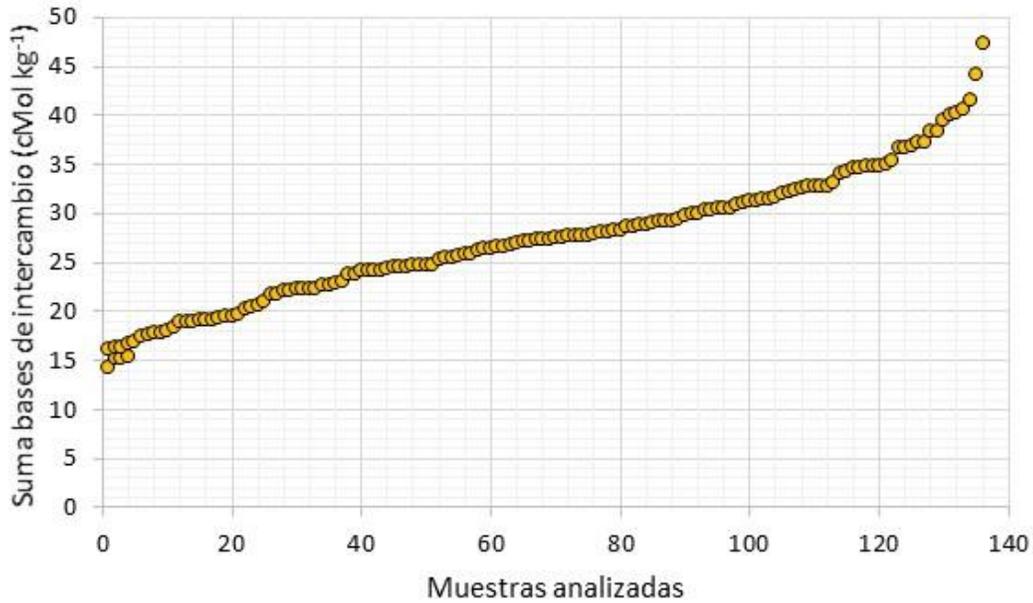


Figura 5.4. Variación de la suma de bases intercambiables en las muestras de suelo que se colectaron en el área agrícola de la región Centro Golfo, Veracruz.

El ámbito de exploración de la sumatoria de las bases de intercambio fluctuó entre  $14.3 \text{ cMol kg}^{-1}$  y  $47.4 \text{ cMol kg}^{-1}$ , con un promedio de  $27.1 \pm 6.7 \text{ cMol kg}^{-1}$ . Esto es congruente con la cantidad y tipo de arcilla presente en los suelos de la región, puesto que los minerales secundarios son los que a través de sus cargas eléctricas son capaces de adsorber a los cationes en su superficie. La heterogeneidad de la distribución de la frecuencia del contenido de bases de intercambio estuvo acorde con los cambios observados en la fracción fina de los suelos (Cuadro 5.2).

Cuadro 5.2. Distribución de frecuencia de la suma de bases intercambiables en las 140 muestras de suelo colectadas en el área de estudio.

Rango $\Sigma B$ (cMol kg <sup>-1</sup> )	<20	20 a 25	25 a 30	30 a 35	>35
D <sub>F</sub> (%)	18	21	29	21	11

Una alta saturación en bases (fundamentalmente de calcio y magnesio) produce la floculación de los coloides y por lo tanto tiene efecto positivo sobre la agregación del suelo. Como se mencionó anteriormente, se espera que un suelo pueda ser más fértil a medida que ambas variables (arcilla y bases intercambiables) también así lo sean. Su tendencia se muestra en la Figura 5.5.

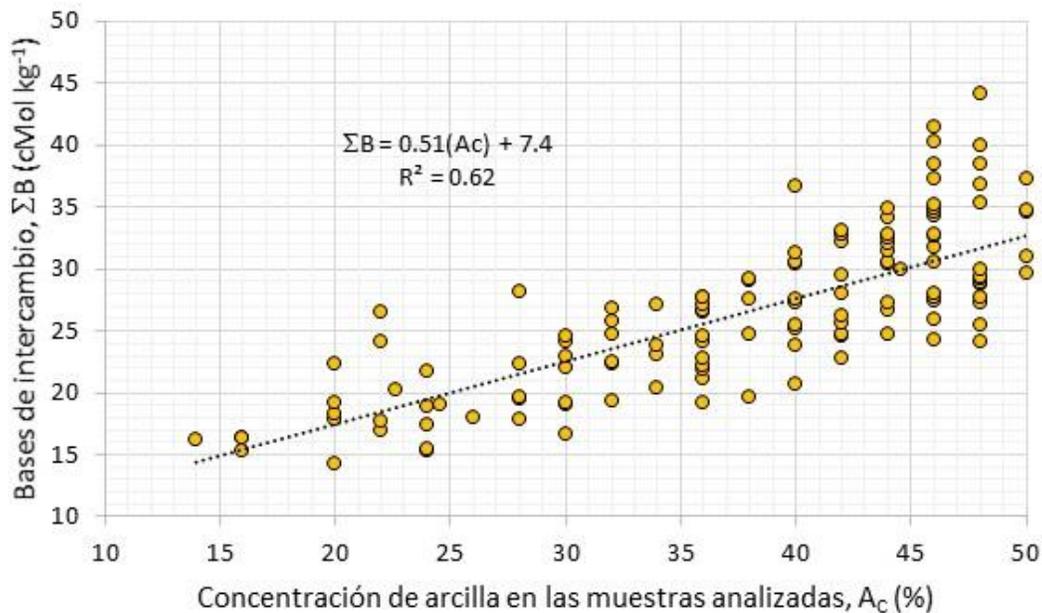


Figura 5.5. Tendencia entre arcilla y bases intercambiables en las muestras de suelo colectadas en el área agrícola de la región Centro Golfo, Veracruz.

Como es de esperarse, se tuvo una tendencia directa y proporcional entre ambas variables, cuyo coeficiente de determinación indica que las arcillas explican en 62% el valor de la sumatoria de bases presentes en el complejo de intercambio, lo que permite ver que como los cationes intercambiables se encuentran en el complejo de adsorción de los minerales secundarios. Aunque esto podría prestarse a especular que habrá también más nutrientes disponibles en el medio edáfico, no quiere decir que los suelos no estén exentos de otro tipo de problemas.

Los suelos arcillosos suelen ser susceptibles a problemas por anegamientos prolongados, lo cual depende desde luego de la frecuencia e intensidad de la precipitación, aunado a condiciones de drenaje natural impedido, mal manejo del agua de riego y escasez de reservas orgánicas edáficas.

El anegamiento no siempre se presenta en forma de encharcamientos, porque el agua también se aloja en los estratos inferiores del perfil, afectando el desarrollo de la raíz del cultivo. Cuando ocurran problemas de anegamientos superficiales o en los estratos inferiores, deben hacerse obras para drenar los excesos para evitar pérdidas de nutrientes y mejorar la productividad de los terrenos.

Para potenciar el efecto de la aplicación de fertilizantes sobre la producción, es indispensable atender los problemas causados por los desórdenes de tipo no nutrimental, los cuales se asocian a las condiciones de suelo y clima de la región, así como al manejo practicado, que en conjunto alteran la respuesta del cultivo a la aplicación de fertilizantes y son ajenos a los desórdenes de tipo nutrimental.

El contenido de materia orgánica de los suelos estudiados fluctuó entre 1.15% y 3.5%, con un promedio de  $2.04 \pm 0.43\%$ . La variación detectada en las distintas muestras analizadas se presenta en la Figura 5.6.

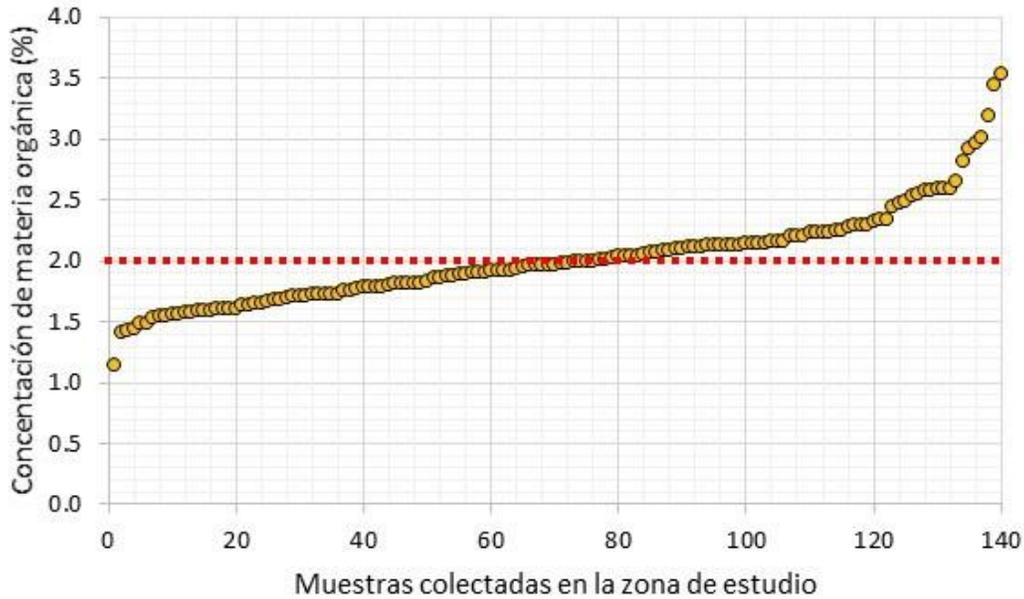


Figura 5.6. Contenido de materia orgánica en las muestras de suelo que se colectaron en el área agrícola de la región Centro Golfo, Veracruz. La línea roja representa el valor promedio.

De acuerdo con la distribución de frecuencia de la materia orgánica en el área de estudio, sólo 4% de las muestras evaluadas presentaron valores de materia orgánica inferiores a 1.5%, pero la mitad de ellas (50%) está entre 1.5 y 2.0%, así como 35% de los casos entre 2.0% y 2.5% de materia orgánica, lo que coincide con lo reportado por Espinoza *et al*, (2012), aunque inferior a lo publicado por Madero *et al* (2011), quienes indicaron un promedio de  $4.85 \pm 25\%$ .

De acuerdo con lo obtenido en el presente estudio, los valores alrededor de 2.0% de materia orgánica podría implicar que aparentemente la escasez de reservas orgánicas no fuese muy relevante, pero si esto se observa con mayor detenimiento, 85% de las muestras estudiadas están alrededor de dicha valor y que podría ser consecuencia de la falta de manejo de residuos de cosecha o de aplicaciones de materiales orgánicos, puesto que la quema de pajas después de la cosecha es una de las prácticas más frecuentes en la región. Si no se incorporan al manejo agrícola

prácticas que conlleven a la conservación de las reservas orgánicas (aportes de residuos de cosecha, compost de materiales de desecho de la agroindustria, entre otros), se afectará de manera negativa la fertilidad física edáfica, propiciando compactación de los terrenos y con ello, falta de aireación y disminución de la productividad. Esta situación se apreció en varios de los predios evaluados, donde se acentúan problemas en la capacidad de almacenamiento de agua por el suelo y bajos rendimientos en general.

En la Figura 5.7 se muestran los resultados del análisis de la densidad aparente en las muestras de suelo colectadas en el área agrícola de la región Centro Golfo, Veracruz.

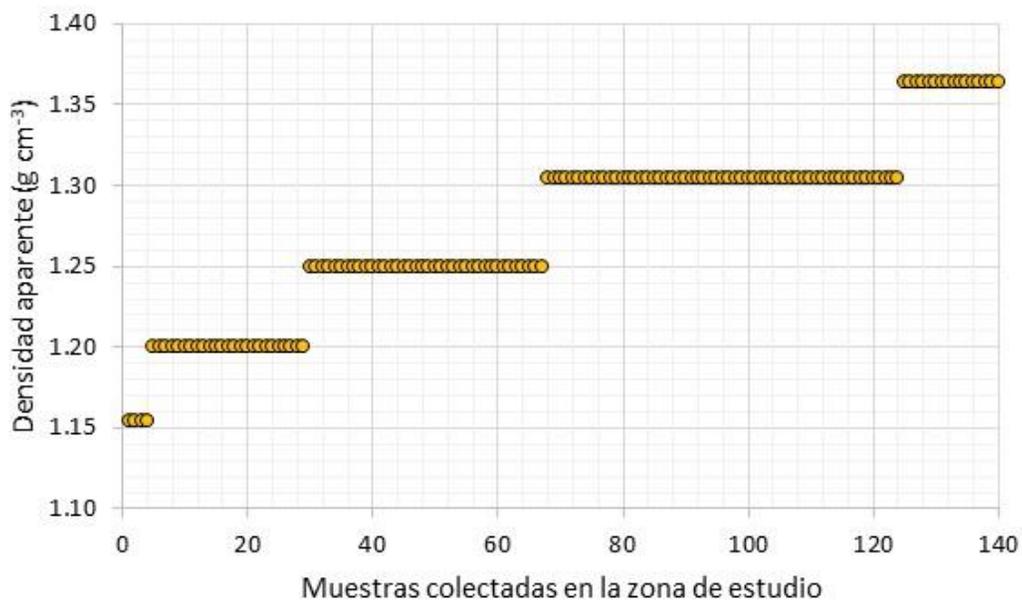


Figura 5.7. Densidad aparente detectada en las muestras de suelo colectadas en el área agrícola de la región Centro Golfo, Veracruz.

El suelo por ser un cuerpo poroso tiene dos densidades, esto es, la real (densidad promedio de sus partículas sólidas) y la aparente, la cual incluye el volumen de poros junto con la fase sólida. La densidad aparente refleja la porosidad del suelo y es importante para definir el manejo porque refleja la compactación y por ende la

facilidad con que fluye el agua y aire a través del medio donde se desarrollan las raíces.

En los intervalos en donde hubo mayor frecuencia para la densidad aparente, se presentó entre  $1.26 \text{ g cm}^{-3}$  y  $1.31 \text{ g cm}^{-3}$  que, según lo reportado por USDA (1999), podría haber una compactación leve, pero antes de afirmar dicha condición, habrá que relacionar esta variable con otras más. Al respecto, es posible que sí ocurra, ya que el tipo de prácticas de riego en la zona donde se tomaron las muestras de suelo predominan las de gravedad, donde se anegan los terrenos y esto explicaría dicho fenómeno, porque se permite que las láminas de arcilla se mantengan hidratadas e impidiendo una rápida infiltración del agua, favoreciendo mayor presión sobre el suelo y consecuentemente, la disminución del espacio poroso. Madero *et al* (2011) estudiaron suelos con problemas de compactación y reportan valores de densidad aparente alrededor de  $1.35 \text{ g cm}^{-3}$  y lo atribuyeron al manejo que se practica en la región.

Otra variable a tomar en cuenta como indicador de problemas es la conductividad eléctrica, puesto que indica la presencia de áreas asociadas a la salinidad del suelo. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 5.8. Como se muestra en la figura en comento, en términos generales, las áreas con problemas relacionadas con la salinidad de los suelos son prácticamente nulas, porque la concentración de sales solubles en la solución del suelo aún no es un factor determinante que pudiese restringir el rendimiento de los cultivos en la gran mayoría de los predios.

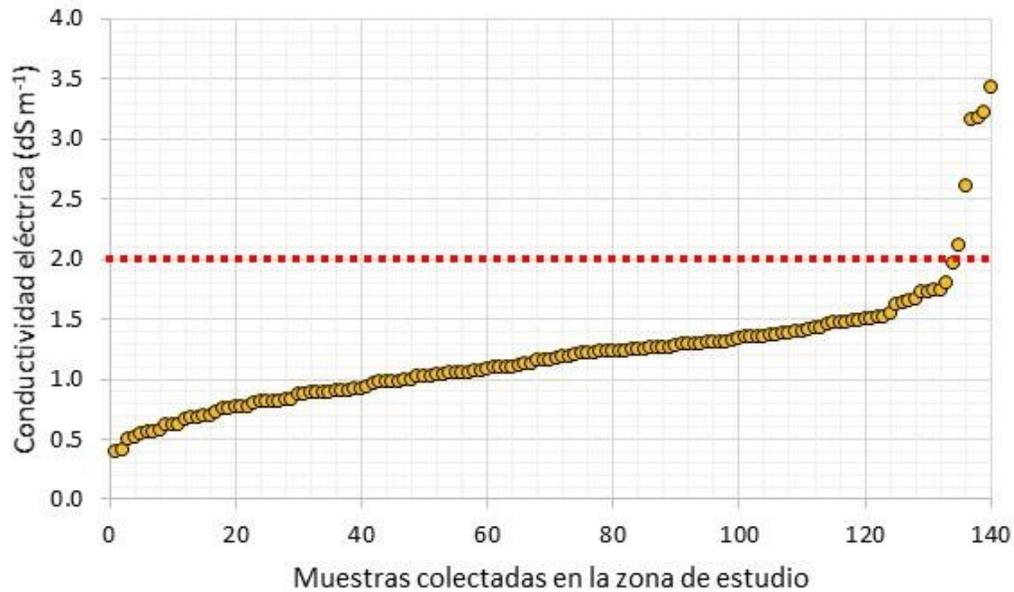


Figura 5.8. Conductividad eléctrica (medido en el extracto de la pasta de saturación) en las muestras de suelo que se colectaron en el área agrícola de la región Centro Golfo, Veracruz. La línea horizontal representa el valor por encima del cual se esperarían problemas en cultivos sensibles a la presencia de sales solubles.

En 34% de las muestras, se detectaron valores de conductividad eléctrica inferiores a  $1.0 \text{ dS m}^{-1}$ , mientras que en 52% de los casos están entre  $1.5$  y  $2.0 \text{ dS m}^{-1}$ , razón por la cual no habría que esperar una restricción del rendimiento de los cultivos. No obstante, también es cierto que ya hay al menos 13% de los terrenos con valores superiores a donde ya cultivos sensibles podrían tener dificultades en su crecimiento y desarrollo por una presión osmótica elevada, donde incluso ya en 13% pudiese también ser restrictivo para cultivos más tolerantes.

Respecto a la capacidad del suelo para contener agua, se suele definir como la cantidad que se pierde al deshidratarse el medio edáfico a  $105^{\circ}\text{C}$ , la cual se expresa como peso de agua por unidad de peso de suelo o como volumen de agua por unidad de volumen de suelo. Así como tal, dicha relación no es suficiente como para

conocer la cantidad que podrían disponer las raíces de los cultivos, sobre todo porque cambia su valor de acuerdo al espacio poroso que se tenga el cual, a su vez, es función de su textura. Entonces, una forma de cuantificar cuánta agua podría quedar almacenada en un suelo es a través de la medición de la curva de retención de humedad, principalmente de dos de sus extremos, que son la capacidad de campo y el punto de marchitez permanente (Figura 5.9).

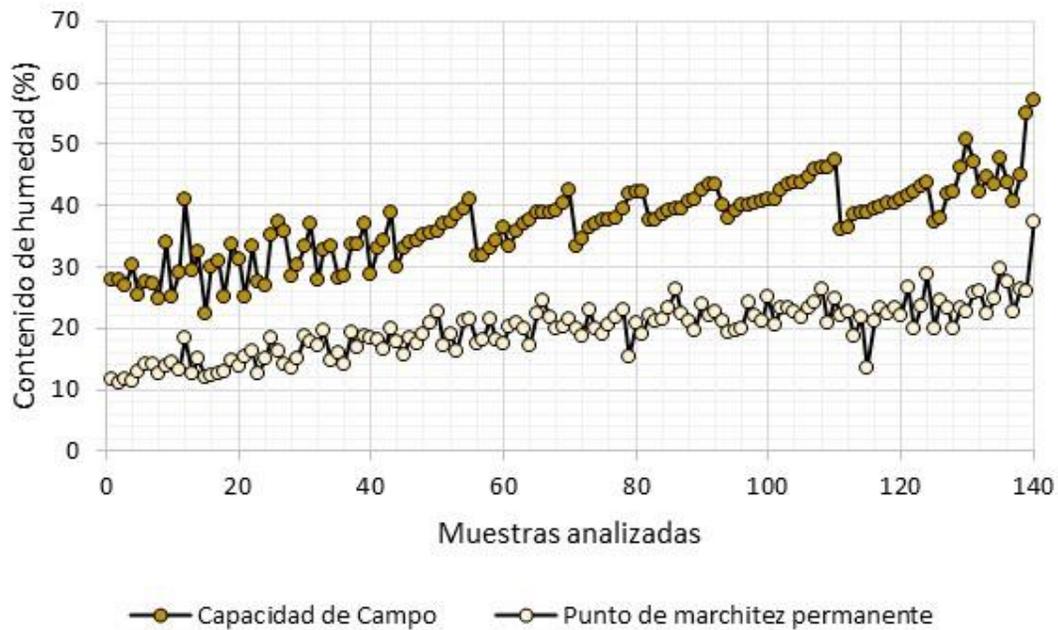


Figura 5.9. Constantes hídricas en las muestras de suelo que se colectaron en el área agrícola de la región Centro Golfo, Veracruz.

Los suelos donde abundan los minerales primarios suelen saturarse con un volumen de agua muy bajo, en comparación con el que puede ser almacenado en un medio edáfico donde predomina la fracción fina. La capacidad de campo se describe como el contenido de agua que queda después de haber drenado el suelo de manera libre (por gravedad), lo cual ocurre al poco tiempo de haberse humedecido totalmente después de una lluvia o por el riego. Su tiempo de residencia es función de las condiciones de cada suelo y se altera por el tipo de estructura y el manejo agrícola. Respecto al punto de marchitez permanente, es el valor que cuando se presenta, la

planta entra en un proceso irreversible, pero no tiene que ver con la sequedad absoluta a la que pudiese llegar el suelo.

En el caso del área de estudio, la relación entre los valores de ambas constantes hídricas presentó una tendencia donde el agua que se encuentra a capacidad de campo suele ser el doble al punto de marchitez permanente (Cuadro 5.3).

Cuadro 5.3. Distribución de frecuencia ( $D_F$ ) de las constantes hídricas (capacidad de campo,  $C_C$  y punto de marchitez permanente,  $P_{MP}$ ) de las muestras de suelo colectadas en el área de estudio.

<b>CC</b>	<b>DF</b>	<b>PMP</b>	<b>DF</b>
%	%	%	%
<30	15	<15	17
30 a 35	19	15 a 18	11
35 a 40	31	18 a 20	21
40 a 45	28	20 a 23	25
>45	7	>23	26

Algunos autores como García *et al*, (2010) reportaron una capacidad de campo de 48% y el punto de marchitez permanente de 33% mientras que, en el trabajo de Madero *et al*, (2011) la capacidad de campo estuvo entre 45 y 50%, con el punto de marchitez permanente de 20 a 21%, valores más cercanos a los que se reportan en esta investigación. Finalmente, es interesante hacer notar que hay un vínculo directo entre ambas constantes y la fracción mineral de los suelos, pero esto se comentará más adelante en el presente documento.

## 5.2 La humedad aprovechable como indicador de la compactación de los suelos agrícolas

Las arcillas constituyen el componente más protagónico de la fracción mineral en cuanto a su vínculo con la capacidad productiva de los suelos, puesto que son las

que tienen la capacidad de reacción química con diferentes componentes, ya sea con los iones presentes en la solución del suelo, como con las moléculas del agua que forman parte de la fase líquida del medio edáfico.

Aunque lo anterior es evidente, también es cierto que su efecto se ve diluido o acentuado según la proporción presente de los demás componentes de la fracción mineral, ya sea limos o arenas. Para el caso del área de estudio, tal y como se evidenció previamente (*cf.* sección 5.1), la participación de los limos es similar en la mayoría de los suelos, pero no así en el caso de las arenas. Por tal motivo, se consideró que el indicador de la proporción del tamaño de partícula ( $I_{TP}$ ) debería estar constituido por el cociente entre arenas y arcillas. Su tendencia respecto a cada grupo textural detectado en el área de estudio se presenta en la Figura 5.10.

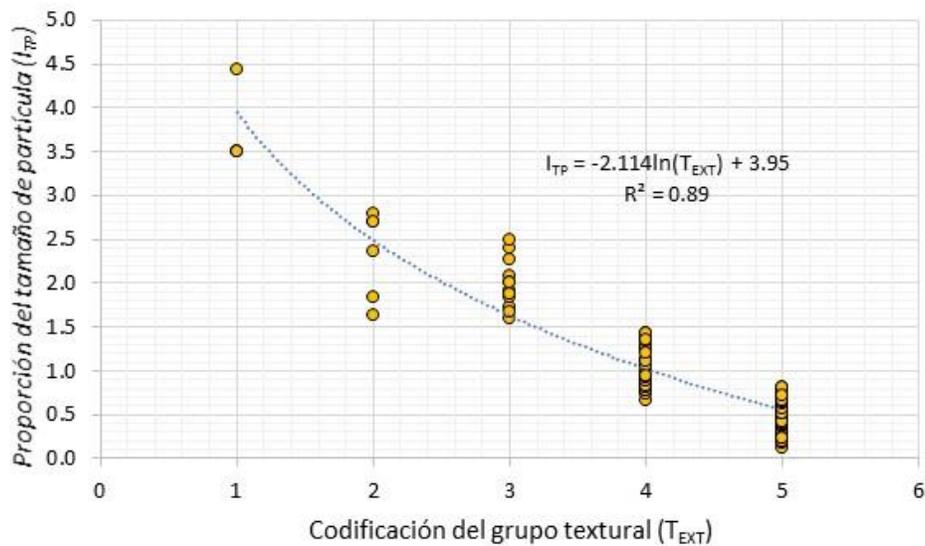


Figura 5.10. Tendencia entre los grupos texturales del suelo ( $T_{EXT}$ ) y el indicador de la proporción del tamaño de partícula ( $I_{TP}$ ), en los suelos colectados en el área agrícola de la región Centro Golfo, Veracruz.  $T_{EXT}$ : 1=franco-arenosa; 2=franco-arcillo-arenosa; 3=franca; 4=franco-arcillosa; 5=arcillosa

Los contrastes que se presentan en el Cuadro 5.4 muestran que el valor promedio de  $I_{TP}$  para cada tipo de textura es significativamente diferente, lo cual representa que cada grupo textural se comportará de manera distinta con las variables

analizadas. Además destaca la textura arcillosa con un promedio de  $I_{TP}$  de 0.5 por lo que teóricamente, entre más pequeñas sean las partículas habrá mayor superficie específica y por lo tanto mayor retención de humedad.

Cuadro 5.4. Contraste de los valores del índice proporcional de la textura del suelo ( $I_{TP}$ ) por grupo textural, de las muestras colectadas en la zona de estudio

$T_{EXT}$	$I_{TP}$	
1	3.73	***
2	2.34	***
3	1.99	***
4	1.03	***
5	0.52	***

Las comparaciones importantes del nivel 0.05 están indicadas por \*\*\*. (LSD  $\alpha = 0.05$ ).  $T_{EXT}$ : 1=franco-arenosa; 2=franco-arcillo-arenosa; 3=franca; 4=franco-arcillosa; 5=arcillosa.

Los resultados del estimador de la fracción arcillosa ( $E_{AC}$ ) se presentan en la Figura 5.11, los cuales se obtuvieron a través de establecer la relación cuantitativa entre la arcilla ( $A_C$ ) y el indicador de la proporción del tamaño de partícula ( $I_{TP}$ ). Cabe reiterar que éste último es el cociente de la fracción arenosa, respecto a la fracción arcillosa de los suelos en estudio.

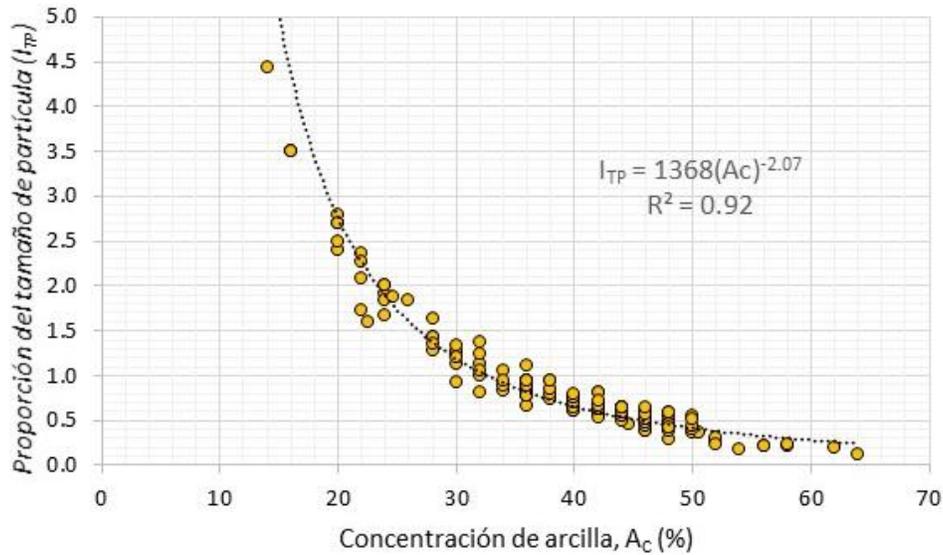


Figura 5.11. La generación del indicador de la fracción arcillosa ( $E_{AC}$ ) es producto de la relación cuantitativa entre la concentración de arcilla ( $A_C$ ) y el indicador de la proporción del tamaño de partícula ( $I_{TP}$ )

La generación del  $E_{AC}$  tuvo como propósito reafirmar las tendencias encontradas entre los componentes de la fracción mineral, donde resalta el ámbito de variación de las arcillas entre los diferentes suelos de la región.

La distribución de los puntos experimentales describió una tendencia entre ambas variables de tipo exponencial, la cual resultó altamente significativa y su coeficiente de determinación fue 0.92. Esto era de esperarse, ya que confirma una vez más los resultados previos obtenidos, donde se manifiesta la relevancia de la fracción arcillosa en el área de estudio. El indicador de la proporción del tamaño de partícula ( $I_{TP}$ ) también se vinculó con ambas constantes hídricas (capacidad de campo y punto de marchitez permanente) para evaluar el grado de asociación entre dichas variables. Los resultados obtenidos se presentan en las Figuras 5.12 y 5.13.

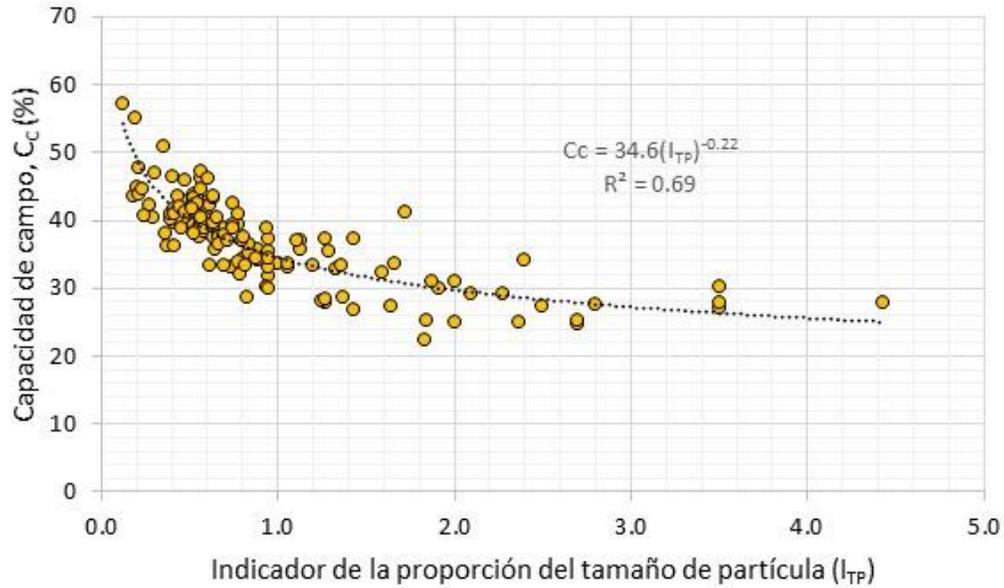


Figura 5.12. Tendencia entre la capacidad de campo ( $C_c$ ) medida en el laboratorio y el indicador de la proporción del tamaño de partícula ( $I_{TP}$ ) en las muestras colectadas en el área de estudio

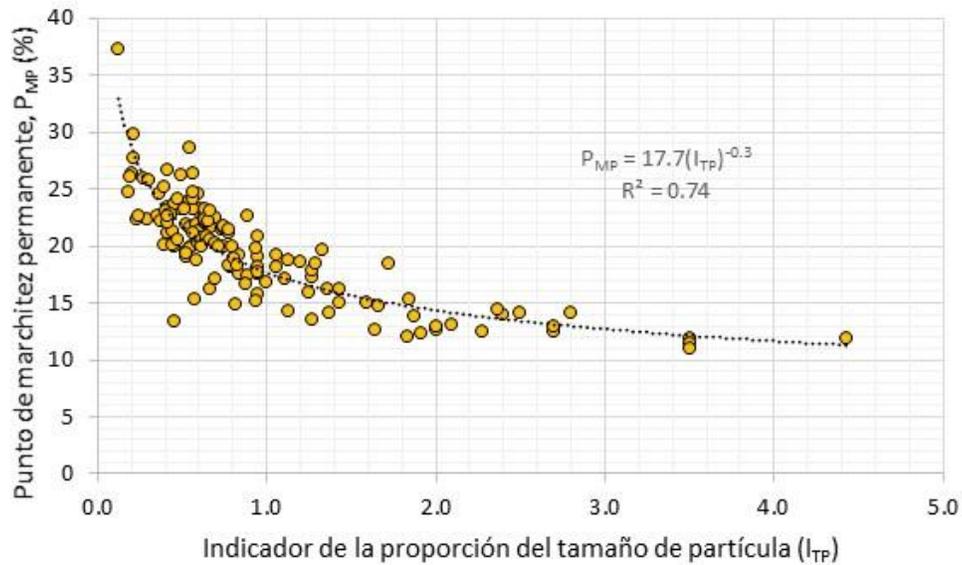


Figura 5.13. Tendencia entre el punto de marchitez permanente ( $P_{MP}$ ) medido en el laboratorio y el indicador de la proporción del tamaño de partícula ( $I_{TP}$ ) en las muestras colectadas en el área de estudio

En ambos casos se relacionaron de manera significativa las constantes hídricas con la fracción mineral de la fase sólida del suelo, representada ésta por el indicador de la proporción del tamaño de partícula ( $I_{TP}$ ). De acuerdo con estos resultados, en las muestras colectadas en el área de estudio, el  $I_{TP}$  explica en 69% y 74% la variación que se observó en la capacidad de campo y el punto de marchitez permanente, respectivamente.

Para continuar con los resultados de este tipo de relaciones, en la Figura 5.14 se presenta la relación del estimador de la densidad aparente, respecto al indicador de la proporción del tamaño de partícula ( $I_{TP}$ ).

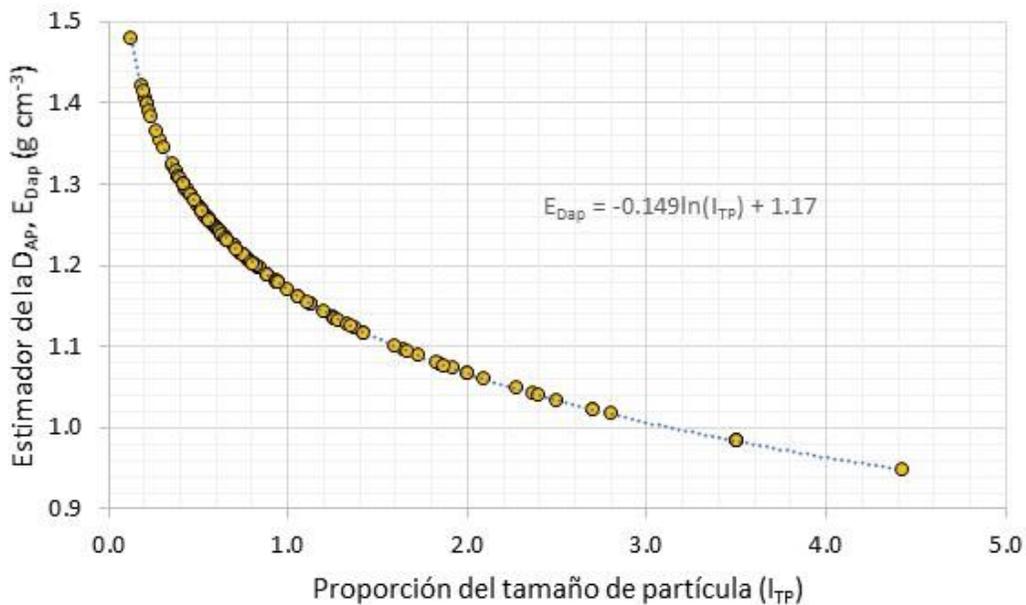


Figura 5.14. Cuantificación de la tendencia entre el estimador de la densidad aparente ( $E_{Dap}$ ) y el indicador de la proporción del tamaño de partícula ( $I_{TP}$ ), donde  $E_{Dap}$  se consideró el valor de la densidad aparente de un suelo si no hubiese compactación, a una condición textural específica.

En la figura en discusión, se está considerando que el estimador de la densidad aparente ( $E_{Dap}$ ) que se generó, indica cuál sería el valor de la densidad aparente del suelo a una condición textural específica, cuando no se presenten problemas de compactación.

Como es de esperarse y dado el origen del indicador de la proporción del tamaño de partícula ( $I_{TP}$ ), la relación entre éste y el  $E_{Dap}$  varía de manera inversa, ya que mientras mayor predominio haya de la fracción fina en un suelo, su densidad aparente será menor y al contrario, si lo que abundan son los minerales primarios, entonces la densidad aparente será mayor. Esto se destaca porque por la diversidad de los componentes en la fase sólida edáfica, es natural que no se tenga un valor único de su densidad y no por ello implicaría necesariamente que se presenten problemas asociados a la compactación del espacio poroso.

Para evaluar las condiciones de compactación del área de estudio, en la Figura 5.15 se presenta la tendencia observada entre la densidad aparente medida en las muestras de los suelos colectados, respecto al estimador  $E_{Dap}$ .

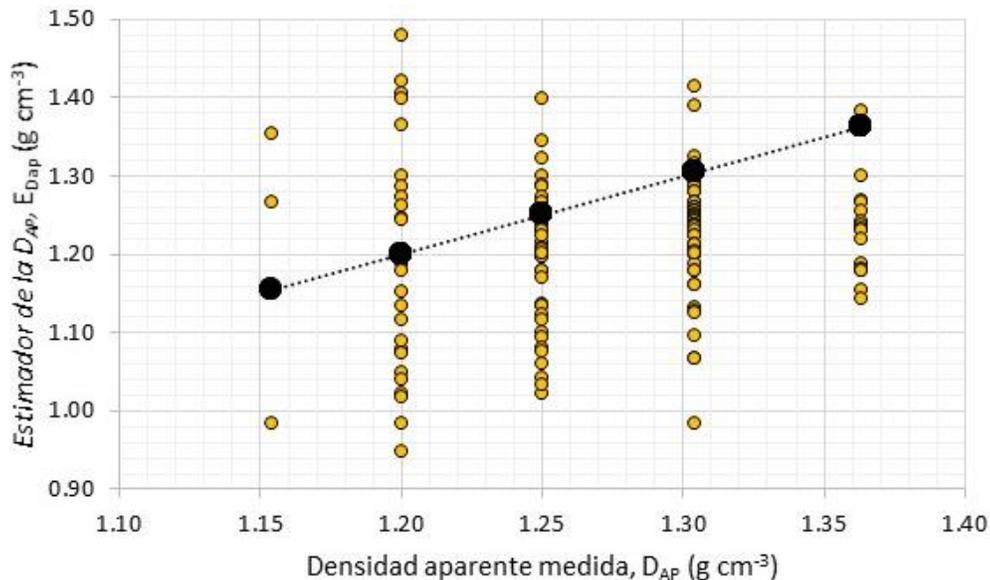


Figura 5.15. Relación entre el valor de la densidad aparente medida en las muestras colectadas en el área de estudio ( $D_{AP}$ ) y su estimador ( $E_{Dap}$ ). El segmento punteado indica la línea 1:1 de la tendencia entre ambas variables.

Como se esperaba, esta figura pone en evidencia la amplia dispersión en los valores de densidad aparente que se encontró en el área de estudio. Con el propósito de entender mejor la repercusión de esta característica del medio edáfico, se generó el indicador  $I_{Dap}$ , el cual es el cociente de la densidad aparente ( $D_{ap}$ ) medido en cada muestra de suelo y su correspondiente valor de  $E_{Dap}$ .

Para interpretar el significado de los valores que pueda adoptar el indicador  $I_{Dap}$ , si es igual a 1, entonces quiere decir que la  $D_{ap}$  del sitio específico que se evalúe, corresponde a la  $D_{ap}$  esperada para un suelo sin que tuviese problemas de compactación. Cuando la magnitud del  $I_{Dap}$  sea mayor a uno, entonces implicaría que el tamaño del espacio poroso de ese suelo será menor al deseable (problemas de compactación) y, al contrario, si es menor, el suelo estaría más suelto con mayor presencia de macro poros.

Con el propósito de observar gráficamente la variación del indicador de la densidad aparente en las muestras colectadas en el área de estudio, se elaboró la Figura 5.16, la cual se presenta a continuación.

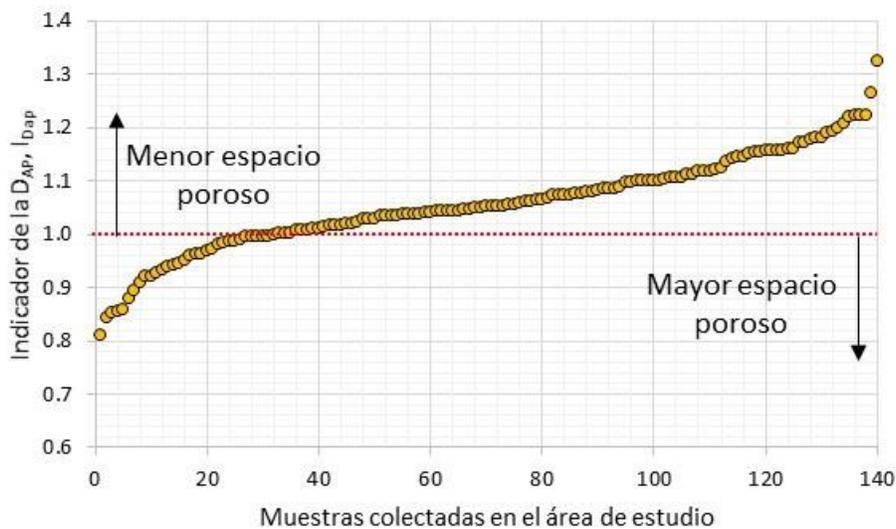


Figura 5.16. Indicador de la densidad aparente ( $I_{Dap}$ ) en las distintas muestras de suelo colectadas en la zona de estudio, el cual se asoció con el tamaño del espacio poroso y, por ende, si hay o no una posible compactación.

La ventaja del indicador de la densidad aparente generado, es que su valor es de aplicación general, indistintamente del grupo textural al que corresponda la muestra que se desee evaluar, ya que en dicha variable está incluida de manera implícita la distribución del tamaño de partícula.

Con la idea de conocer la influencia de la densidad aparente sobre las demás variables que se han discutido hasta el momento en este documento, se empleó el indicador  $A_{Dap}$  que se generó con el propósito agrupar las muestras colectadas en el área de estudio, con base en el criterio de la magnitud de su densidad aparente y así tener la capacidad de analizar estadísticamente dicha variable (Cuadro 5.5). Cabe recordar que la codificación para la clasificación de la densidad aparente ( $A_{Dap}$ ) se generó a través de la asignación de un número consecutivo, según el valor obtenido del  $I_{Dap}$  previamente discutido.

Cuadro 5.5. Agrupación de las variables analizadas en las muestras colectadas en el área de estudio, con base en la codificación generada para la clasificación de la densidad aparente ( $A_{Dap}$ )

$A_{Dap}$	$A_R$	$L_M$	$A_C$	$I_{TP}$	$D_{ap}$	$M_O$	$C_C$	$P_{MP}$	$H_A$
	%	%	%		$g\ cm^{-3}$	%	%	%	%
1	12 e	33 a	55 a	0.20 d	1.20 c	2.20 a	46 a	28 a	18 ab
2	19 de	30 a	50 ab	0.40 d	1.23 bc	2.00 b	44 b	24 b	20 a
3	22 d	32 a	46 b	0.50 cd	1.27 a	2.10 ab	41 bc	23 b	19 ab
4	27 c	31 a	43 b	0.60 c	1.28 a	2.00 b	40 bc	21 bc	19 ab
5	31 c	32 a	37 c	0.90 c	1.29 a	2.10 ab	36 c	19 c	17 b
6	38 bc	31 a	31 cd	1.30 bc	1.28 a	2.00 b	33 cd	17 c	16 bc
7	43 b	30 a	27 d	1.80 b	1.29 a	1.90 bc	30 d	15 cd	15 c
8	53 a	27 b	19 e	2.90 a	1.26 b	1.80 c	28 d	12 d	15 c

$A_R$ =arena;  $L_M$ =limo;  $A_C$ =arcilla;  $I_{TP}$ =proporción del tamaño de partícula;  $D_{ap}$ =densidad aparente;  $M_O$ =materia orgánica;  $C_C$ = capacidad de campo;  $P_{MP}$ = punto de marchitez permanente;  $H_A$ = humedad aprovechable

Con el propósito de evaluar las condiciones edáficas en el área de estudio, se elaboró el Cuadro 5.6, en el que se presenta el coeficiente de correlación entre el indicador del grupo textural y las distintas variables medidas, así como las que se crearon como índices o se reconvirtieron.

Cuadro 5.6. Coeficiente de correlación (r) entre el indicador del grupo textural ( $T_{EXT}$ ) y las variables consideradas (X) para evaluar las condiciones edáficas en el área de estudio

$T_{EXT} = f(X_1) \dots X_1 = \text{variables medidas en el laboratorio}$							
Variable	$A_R$	$L_M$	$A_C$	$D_{ap}$	$M_O$	$\Sigma_B$	$C_E$
Correlación (r)	-0.87	0.09	0.88	0.31	0.14	0.71	0.48
$T_{EXT} = f(X_2) \dots X_2 = \text{Índices asociados a la fracción mineral}$							
Variable	$I_{TP}$	$E_{ac}$	$E_{Dap}$	$I_{Dap}$	$A_{Dap}$		
Correlación (r)	-0.94	-0.92	0.86	-0.73	-0.72		
$T_{EXT} = f(X_3) \dots X_3 = \text{variables asociadas a las constantes hídricas}$							
Variable	$C_C$	$P_{MP}$	$H_A$	$C_{ce}$	$P_{MPe}$	$H_{Ae}$	
Correlación (r)	0.74	0.76	0.37	0.82	0.80	0.87	

$A_R$ =arena;  $L_M$ =limo;  $A_C$ =arcilla;  $D_{ap}$ =densidad aparente;  $M_O$ =materia orgánica;  $\Sigma_B$ =suma de bases de intercambio;  $C_E$ =conductividad eléctrica;  $I_{TP}$ =proporción del tamaño de partícula;  $E_{ac}$ = estimador de la fracción arcillosa;  $E_{Dap}$ = estimador de la densidad aparente;  $I_{Dap}$ = índice de la densidad aparente;  $A_{Dap}$ = agrupación de la densidad aparente;  $C_C$ = capacidad de campo;  $P_{MP}$ = punto de marchitez permanente;  $H_A$ = humedad aprovechable;  $C_{ce}$ = estimación de la capacidad de campo;  $P_{MPe}$ = estimación del punto de marchitez permanente;  $H_{Ae}$ = estimación de la humedad aprovechable

Con base en los resultados, se aprecia que los índices asociados a la fracción mineral poseen una relación con la textura, principalmente las que interactúan por medio de cargas eléctricas, por lo tanto, la arcilla, suma de bases de intercambio y conductividad eléctrica, mostraron una correlación significativamente positiva.

Además las constantes hídricas presentaron una correlación positiva con la textura, esto debido que 84% de la fracción del suelo es de textura arcillosa. Corroborando así la interacción entre la arcilla y las constantes referentes a la humedad del suelo. En seguimiento a lo anterior, se descartaron las que no tuvieron una correlación significativa y, las que sí la presentaron, se hizo una prueba de medias para comparar qué tanta diferencia hay en cada caso por grupo textural (Cuadro 5.7).

Cuadro 5.7. Análisis de los cambios en las variables evaluadas (X) por efecto del grupo textural ( $T_{EXT}$ ), de acuerdo a su correlación (r) generada al compararlas entre sí [ $T_{EXT} = f(X)$ ]

$T_{EXT}$	ITP	$E_{Ac}$	Ac	AR	$H_{Ae}$	$E_{Dap}$	$C_{Ce}$
	adim	adim	%	%	%	$g\ cm^{-3}$	%
r [ $T_{EXT} = f(X)$ ]	-0.94	-0.92	0.88	-0.87	0.87	0.86	0.82
Franco-arenosa	3.73 a	4.73 a	16 d	58 a	14 b	0.97 bc	26 c
Franco-arcillo-arenosa	2.34 a	2.25 b	23 c	52 ab	15 b	1.05 b	29 c
Franco	1.99 b	2.14 b	23 c	45 b	15 b	1.07 b	30 c
Franco-arcillosa	1.03 bc	0.98 c	33 b	34 c	17 ab	1.17 ab	35 b
Arcillosa	0.52 c	0.5 c	46 a	23 d	18 a	1.28 a	41 a
$T_{EXT}$	$P_{MPe}$	$P_{MP}$	$C_c$	$I_{Dap}$	$A_{Dap}$	$\Sigma_B$	
	%	%	%	adim	adim	$cMol\ kg^{-1}$	
r [ $T_{EXT} = f(X)$ ]	0.80	0.76	0.74	-0.73	-0.72	-0.71	
Franco-arenosa	12 c	12 c	28 c	1.25 a	8 a	16.10 d	
Franco-arcillo-arenosa	14 b	14 b	26 d	1.18 b	7 b	18.40 cd	
Franco	14 b	14 b	31 bc	1.16 bc	7 b	19.40 c	
Franco-arcillosa	18 a	18 a	34 b	1.09 c	5 bc	23.50 b	
Arcillosa	22 a	22 a	41 a	1.01 c	4 c	31.30 a	

adim= adimensional;  $A_R$ =arena;  $A_c$ =arcilla;  $\Sigma_B$ =suma de bases de intercambio; ITP=proporción del tamaño de partícula;  $E_{Ac}$ = estimador de la fracción arcillosa;  $E_{Dap}$ = estimador de la densidad aparente;  $I_{Dap}$ = índice de la densidad aparente;  $A_{Dap}$ = agrupación de la densidad aparente;  $C_c$ = capacidad de campo;  $P_{MP}$ = punto de marchitez permanente;  $H_A$ = humedad aprovechable;  $C_{Ce}$ =

estimación de la capacidad de campo;  $P_{MPe}$ = estimación del punto de marchitez permanente;  $H_{Ae}$ = estimación de la humedad aprovechable

Las diferencias que presentaron los parámetros conforme al tipo de textura (Cuadro 5.7), son notorias, en el sentido que la textura franco-arenosa y franco-arcillo-arenosa, mostraron semejanzas al tipo de letra que se asignó debido a la diferencia que presentaban, lo mismo ocurrió entre las texturas franco-arcillosa y arcillosa, manifestando así el contraste que existió entre el tipo de textura con las variables que se analizaron.

## VI CONCLUSIONES

La densidad aparente medida en las muestras de suelos colectadas en la zona de estudio, tuvo un estrecho ámbito de exploración y no permitió detectar cambios del suelo, razón por la cual no tuvo una relación significativa con las diversas fracciones minerales ni con la materia orgánica edáfica. Lo anterior está en relación con la hipótesis propuesta, donde se estableció que la densidad aparente no es viable para ser considerada como indicador de las condiciones productivas del suelo.

Ambas constantes hídricas (capacidad de campo y punto de marchitez permanente) se relacionaron de manera directa y estrecha con la fracción mineral edáfica, sobre todo con la cantidad de arcillas del suelo, indistintamente de la magnitud de las demás variables consideradas en la presente investigación. Por ello, se acepta la hipótesis planteada y las dos pueden ser empleadas para indicar la modificación de la capacidad del suelo para almacenar agua, así como de la compactación de los terrenos agrícolas.

## VII BIBLIOGRAFÍA

- Abdi, E., Babapour, S., Majnounian, B., Amiri, G. Z., & Deljouei, A. 2018. How does organic matter affect the physical and mechanical properties of forest soil? *Journal of forestry research*, 29(3), 657-662
- Alameda, D., and Villar, R. 2012. Linking root traits to plant physiology and growth in *Fraxinus angustifolia* Vahl. Seedlings under soil compaction conditions. *Environmental and Experimental Botany*, 79, 49-57
- Alameda, D., Anten, N. P., and Villar, R. 2012. Soil compaction effects on growth and root traits of tobacco depend on light, water regime and mechanical stress. *Soil and Tillage Research*, 120, 121-129
- Alaoui, A., Lipiec, J., and Gerke, H. H. 2011. A review of the changes in the soil pore system due to soil deformation: A hydrodynamic perspective. *Soil and Tillage Research*, 115, 1-15
- Alaoui, A., Rogger, M., Peth, S., & Blöschl, G. 2018. Does soil compaction increase floods? A review. *Journal of hydrology*, 557, 631-642
- Arvidsson, J., and Håkansson, I. 2014. Response of different crops to soil compaction-Short-term effects in Swedish field experiments. *Soil and Tillage Research*, 138, 56-63
- Attom, M., Abed, F., Elemam, M., Nazal, M., and ElMessalami, N. 2016. The effect of treated waste-water on compaction and compression of fine soil. *International Journal of Civil, Environmental, Structural, Construction and Architectural Engineering*, 10, 1111-1115
- Barzegar, A., Yousefi, A., and Zargoosh, N. 2016. Water stress and soil compaction impacts on clover growth and nutrient concentration. *Eurasian Journal of Soil Science*, 5(2), 139
- Berisso, F. E., Schjøning, P., Keller, T., Lamandé, M., Etana, A., de Jonge, L. W. and Forkman, J. 2012. Persistent effects of subsoil compaction on pore size distribution and gas transport in a loamy soil. *Soil and Tillage Research*, 122, 42-51
- Blanco-Canqui, H. 2017. Biochar and soil physical properties. *Soil Science Society of America Journal*, 81(4), 687-711
- Bogunovic I, Kistic, I. 2014. Compaction and soil water content in tillage induced system *Contemporary Agriculture* 63(3):251-259
- Bogunovic, I., Pereira, P., Kistic, I., Sajko, K., and Sraka, M. 2018. Tillage management impacts on soil compaction, erosion and crop yield in Stagnosols (Croatia). *Catena*, 160, 376-384

- Carlesso, L., Beadle, A., Cook, S. M., Evans, J., Hartwell, G., Ritz, K., Murray, P. J. 2019. Soil compaction effects on litter decomposition in an arable field: Implications for management of crop residues and headlands. *Applied Soil Ecology*, 134, 31-37
- Chamen, W. T., Moxey, A. P., Towers, W., Balana, B., and Hallett, P. D. 2015. Mitigating arable soil compaction: A review and analysis of available cost and benefit data. *Soil and Tillage Research*, 146, 10-25
- Chen, G., Weil, R. R., and Hill, R. L. 2014. Effects of compaction and cover crops on soil least limiting water range and air permeability. *Soil and Tillage Research*, 136, 61-69
- Chen, Y. L., Palta, J., Clements, J., Buirchell, B., Siddique, K. H., and Rengel, Z. 2014. Root architecture alteration of narrow-leafed lupin and wheat in response to soil compaction. *Field Crops Research*, 165, 61-70
- Enez, K., Sariyildiz, T., Savaci, G., and Aricak, B. 2016. Variation in some soil properties, organic matter and soil compaction after logging activities. *European Journal of Forest Engineering*, 2(2), 82-88
- Esteban, D. A. A., de Souza, Z. M., Tormena, C. A., Lovera, L. H., de Souza Lima, E., de Oliveira, I. N., and de Paula Ribeiro, N. 2019. Soil compaction, root system and productivity of sugarcane under different row spacing and controlled traffic at harvest. *Soil and Tillage Research*, 187, 60-71
- García, R., Sánchez, I., Vidal, M., Betancourt, L., Llano, J. 2010. Efecto de la compactación sobre las propiedades físicas del suelo y el crecimiento de la caña de azúcar. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 19(2), 51-56
- Garg, A., Huang, H., Kushvaha, V., Madhushri, P., Kamchoom, V., Wani, I., Koshy, N and Zhu, H. H. 2020. Mechanism of biochar soil pore–gas–water interaction: gas properties of biochar-amended sandy soil at different degrees of compaction using KNN modeling. *Acta Geophysica*, 68(1), 207-217
- Gossen, B. D., Kasinathan, H., Deora, A., Peng, G., and McDonald, M. R. 2016. Effect of soil type, organic matter content, bulk density and saturation on clubroot severity and biofungicide efficacy. *Plant Pathology*, 65(8), 1238-1245
- Guo, L., Wu, G., Li, Y., Li, C., Liu, W., Meng, J., Jiang, G. 2016. Effects of cattle manure compost combined with chemical fertilizer on topsoil organic matter, bulk density and earthworm activity in a wheat–maize rotation system in Eastern China. *Soil and Tillage Research*, 156, 140-147
- Gusli, S., Sumeni, S., Sabodin, R., Muqfi, I. H., Nur, M., Hairiah, K., van Noordwijk, M. 2020. Soil Organic Matter, Mitigation of and Adaptation to Climate Change in Cocoa–Based Agroforestry Systems. *Land*, 9(9), 323

- Hartmann, M., Niklaus, P. A., Zimmermann, S., Schmutz, S., Kremer, J., Abarenkov, K., Lüscher, P., Wildmer, F. and Frey, B. 2014. Resistance and resilience of the forest soil microbiome to logging-associated compaction. *The ISME journal*, 8(1), 226-244
- Hu, W., Jia, X., Zhu, X., Su, A., Du, Y., and Huang, B. 2020. Influence of moisture content on intelligent soil compaction. *Automation in Construction*, 113, 103141
- Hussain, R., Ravi, K., and Garg, A. 2020. Influence of biochar on the soil water retention characteristics (SWRC): potential application in geotechnical engineering structures. *Soil and Tillage Research*, 204, 104713
- Ishak, L., and Brown, P. H. 2018. Changes in microbiocommunity as affected by soil compaction and organic matter amendment. *International Journal on Advanced Science Engineering and Information Technology*, 8(6), 2349-2354
- Jenny, H. 1994. *Factors of soil formation: a system of quantitative pedology*. Courier Corporation
- Kibblewhite, M. G., Chambers, B. J., and Goulding, K. W. T. 2016. How good is the evidence to support investment in soil protection? *Soil Use and Management*, 32, 172-182.
- King, A. E., Ali, G. A., Gillespie, A. W., & Wagner-Riddle, C. 2020. Soil Organic Matter as Catalyst of Crop Resource Capture. *Frontiers in Environmental Science*
- Kuncoro, P. H., Koga, K., Satta, N., and Muto, Y. 2014. A study on the effect of compaction on transport properties of soil gas and water. II: Soil pore structure indices. *Soil and Tillage research*, 143, 180-187
- Lal, R. 2004. Soil Carbon Sequestration impacts on global climate change and food security. *Science* 304:1623–1627
- Lipiec, J., Horn, R., Pietrusiewicz, J., and Siczek, A. 2012. Effects of soil compaction on root elongation and anatomy of different cereal plant species. *Soil and Tillage Research*, 121, 74-81
- Madero, E., Ramírez, A., Albán, A., Escobar, B., García, L., Peña, M. 2011. Compactación de suelos con caña de azúcar en la zona sur del Valle del Cauca. *Acta agronómica*. 60:3, 245-252
- Massah, J., and Azadegan, B. 2016. Effect of chemical fertilizers on soil compaction and degradation. *Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America*, 47(1), 44-50
- Nawaz, M. F., Bourrie, G., and Trolard, F. 2013. Soil compaction impact and modelling. A review. *Agronomy for sustainable development*, 33(2), 291-309

- Nazari, M., Horvat, M., Joergensen, R. G., and Peth, S. 2020. Soil organic matter mobilization by re-compaction of old forest skid trails. *European Journal of Soil Biology*, 98, 103173
- Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000, Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis
- Reichardt, K., Timm, L.C. 2020. *Soil, Plant and Atmosphere: Concepts, Processes and Applications*. 1st edition. Springer International Publishing, Cham, Switzerland 469 p.
- Tisdall, J.M., and J.M. Oades. 1982. Organic matter and water stable aggregates in soil. *J. of Soil Science*. 33: 141–163.
- Shah, A. N., Tanveer, M., Shahzad, B., Yang, G., Fahad, S., Ali, S., and Souliyanonh, B. 2017. Soil compaction effects on soil health and crop productivity: an overview. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(11), 10056-10067.
- Sistema de Información Agropecuaria (SIAP). (2019). Sistema de información agropecuaria. Disponible en Internet: [http://www.siap.gob.mx/index.php?option=com\\_content&view=article&id=53&Itemid=325](http://www.siap.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=53&Itemid=325).
- USDA. 1999. Guía para la evaluación de la calidad y la salud del suelo. Servicio de Conservación de Recursos Naturales. Departamento de Agricultura de Estados Unidos. 82
- Wang, D., Blumfield, T. J., and Xu, Z. 2020. Long-term impacts of soil compaction and cultivation on soil carbon and nitrogen pools, foliar delta C-13 and delta N-15 as well as tree growth in a hoop pine plantation of subtropical Australia. *Journal of Soil Sediments*
- Weil, R.R., and Brady, N.C. 2017. *The nature and properties of soils* 15th edition
- Wong, J. T. F., Chen, Z., Chen, X., Ng, C. W. W., and Wong, M. H. 2017. Soil-water retention behavior of compacted biochar-amended clay: a novel landfill final cover material. *Journal of soils and sediments*, 17(3), 590-598
- Zhang, J., Busse, M. D., Young, D. H., Fiddler, G. O., Sherlock, J. W., and TenPas, J. D. 2017. Aboveground biomass responses to organic matter removal, soil compaction, and competing vegetation control on 20-year mixed conifer plantations in California. *Forest ecology and management*, 401, 341-353