



# COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO DE EDAFOLOGÍA

## MUCÍLAGO DE NOPAL (*Opuntia* spp.) SOBRE PROPIEDADES MICROMORFOLÓGICAS Y ESTRUCTURALES DEL SUELO EN TRIGO

BRAULIO GARCÍA FAVELA

T E S I S

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL

PARA OBTENER EL GRADO DE:

DOCTOR EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MÉXICO

2013

La presente tesis titulada: **MUCÍLAGO DE NOPAL (*Opuntia spp.*) SOBRE PROPIEDADES MICROMORFOLÓGICAS Y ESTRUCTURALES DEL SUELO EN TRIGO** realizada por el alumno: BRAULIO GARCÍA FAVELA bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

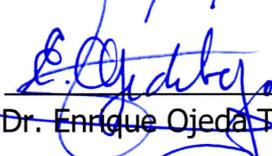
DOCTOR EN CIENCIAS  
EDAFOLOGÍA

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Roberto Quintero Lizaola

ASESOR

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Enrique Ojeda Trejo

ASESOR

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Antonio Trinidad Santos

ASESOR

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Alejandro Alarcón

ASESOR

  
\_\_\_\_\_  
Dr. David Espinosa Victoria

ASESOR

  
\_\_\_\_\_  
Dra. Elizabeth González Estrada

Montecillo, Texcoco, Estado de México, Julio del 2013

## **AGRADECIMIENTOS**

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el financiamiento otorgado para la realización de los estudios de doctorado.

A la Universidad Autónoma Chapingo que a través del Departamento de Preparatoria Agrícola por permitirme la oportunidad de superación.

Al Colegio de Postgraduados, en especial al Programa de Edafología por mis estudios de doctorado.

Al personal del laboratorio de Física de suelo del Área de Edafología por el apoyo otorgado en la realización del presente trabajo.

Al Programa de Botánica del C.P. por el apoyo otorgado para la realización de una parte del trabajo experimental en las cámaras de ambiente controlado.

Al Dr. Roberto Quintero Lizaola por la guía adecuada y la culminación de mis estudios.

A los Doctores: Enrique Ojeda Trejo, Antonio Trinidad Santos, David Espinosa Victoria, Alejandro Alarcón y la Doctora Elizabeth González Estrada por sus sugerencias, consejos y colaboración en culminación del trabajo.

## DEDICATORIAS

A mi esposa:

Con amor a María Dolores Rocío Muñoz Flores por su gran apoyo en todo momento.

A la memoria de mis padres:

Carlos García Calzada y María Favela García.

A mis hijos:

Nancy, Ricardo y Braulio.

A mis hermanos:

Faustino, Silverio, Nicolás, Petra, Octaviano, Benito, Carlos y Esther.

A mi nieto:

Franco Damián García Santillán.

## ÍNDICE

Índice de cuadros .....	viii
Índice de figuras .....	x
RESUMEN .....	xiv
I. INTRODUCCIÓN .....	1
II. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1. Los nopales.....	3
2.2. Variedades cultivadas.....	3
2.3. Descripción de la planta .....	4
2.3.1. La raíz .....	4
2.3.2. El tallo.....	4
2.3.3. Corteza y médula.....	5
2.3.4 Origen y distribución geográfica .....	6
2.3.5. Usos del nopal y mucílago.....	6
2.4. El mucílago de nopal .....	10
2.4.1. Solubilidad del mucílago de <i>Opuntia ficus indica</i> .....	10
2.5. Sustancias no húmicas.....	11
2.5.1. Los carbohidratos o polisacáridos .....	11
2.5.2. Los carbohidratos como componentes de la materia orgánica del suelo .....	12
2.6. La raíz y su importancia en la estructuración del suelo .....	12
2.6.1. Exudados radicales .....	14
2.7. La agregación y la estructura del suelo .....	16
2.8. Suelo Vertisoles.....	17
2.9. Suelos arenosos.....	18
2.10. BIBLIOGRAFÍA GENERAL.....	20
III. OBJETIVOS .....	26
3.1. Objetivo general.....	26
3.1.1. Objetivos específicos.....	26
IV. HIPÓTESIS.....	27
V. DOSIS DE MUCÍLAGO DE NOPAL ( <i>Opuntia spp.</i> ) EN LOS COMPONENTES DE RENDIMIENTO DE TRIGO ( <i>Triticum aestivum</i> L.). .....	28
5.1. RESUMEN .....	28

5.2. ABSTRACT .....	29
5.3. INTRODUCCIÓN .....	30
5.4. MATERIALES Y MÉTODOS.....	32
5.4.1. Descripción de la zona de recolección del suelo arcilloso .....	32
5.4.2. Descripción de la zona de recolección del suelo arenoso.....	32
5.4.3. Homogeneización de las muestras de suelo arcilloso y arenoso.....	33
5.5. Extracción del mucílago de nopal.....	34
5.6. Unidades experimentales.....	34
5.7. Tratamientos .....	34
5.8. Material genético. ....	37
5.9. Componentes de rendimiento evaluados con diferentes dosis de mucílago en suelo arcilloso y arenoso .....	37
5.10. Análisis estadístico .....	37
5.11. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	38
5.11.1. Registro de temperaturas .....	38
5.11.2. Cantidad de agua.....	39
5.11.3. Altura de planta.....	41
5.11.4. Número de hojas .....	43
5.11.5. Peso de grano.....	45
5.11.6. Número de semillas.....	47
5.11.7. Materia seca .....	51
5.12. CONCLUSIONES .....	54
5.13. BIBLIOGRAFÍA .....	55
VI. DOSIS DE MUCÍLAGO DE NOPAL ( <i>Opuntia spp.</i> ) EN LA EVALUACIÓN MICROESTRUCTURAL DEL SUELO.....	60
6.1. RESUMEN .....	60
6.2. ABSTRACT .....	61
6.3. INTRODUCCIÓN .....	62
6.4. MATERIALES Y MÉTODOS.....	64
6.4.1. Unidades experimentales.....	64
6.4.2. Tratamientos .....	65
6.4.3. Cámara de ambiente controlado. ....	68
6.4.4. Análisis de imágenes .....	68
6.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	71

6.5.1. Descripción de láminas delgadas para el primer muestreo de suelos con textura arcillosa y arenosa con diferentes dosis de mucílago de nopal .....	71
6.5.2. Descripción de láminas delgadas para el segundo muestreo en suelos arcilloso y arenoso con diferentes dosis de mucílago de nopal.....	80
6.5.3. Descripción de láminas delgadas para el tercer muestreo en suelos con textura arcillosa y arenosa con diferentes dosis de mucílago de nopal .....	85
6.6. CONCLUSIONES .....	90
6.7. BIBLIOGRAFÍA.....	91
VII. MÚCILAGO DE NOPAL ( <i>Opuntia spp.</i> ) EN LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DEL SUELO.....	95
7.1. RESUMEN .....	95
7.2. ABSTRACT .....	96
7.3. Introducción .....	97
7.4. MATERIALES Y MÉTODOS.....	99
7.4.1. Unidades experimentales.....	99
7.4.2. Tratamientos .....	99
7.4.3. Cámara de ambiente controlado. ....	102
7.4.4. Evaluación de la variación de las propiedades físicas y químicas por el efecto de diferentes dosis de mucílago de nopal.....	102
7.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	105
7.5.1. Distribución del tamaño de partícula.....	105
7.5.2. Estabilidad de los agregados en húmedo en suelos con textura arcillosa y arenosa .....	107
7.5.3. Estabilidad estructural .....	112
7.5.4. Contenido de carbono (%) .....	116
7.5.5. Nitrógeno total.....	126
8.5.6. Relación carbono/nitrógeno. ....	131
7.6. CONCLUSIONES .....	136
7.7. BIBLIOGRAFÍA.....	137

## Índice de cuadros

<b>Cuadro</b>		<b>Página</b>
<b>Cuadro 1</b>	<b>Tratamientos aplicados al suelo arcilloso, para la primera columna tenemos que: T= Tratamiento, la primera cantidad al porcentaje de mucílago, la segunda al porcentaje de agua.</b>	<b>35</b>
<b>Cuadro 2</b>	<b>Tratamientos aplicados al suelo arenoso, para la primera columna tenemos que: T= Tratamiento; la primera cantidad al porcentaje de mucílago, la segunda al porcentaje de agua.</b>	<b>36</b>
<b>Cuadro 3</b>	<b>Tratamientos aplicados al suelo arcilloso, para la primera columna tenemos que: T= Tratamiento, la primera cantidad corresponde al porcentaje de mucílago, la segunda al porcentaje de agua</b>	<b>66</b>
<b>Cuadro 4</b>	<b>Tratamientos aplicados al suelo arenoso, para la primera columna tenemos que: T= Tratamiento, la primera cantidad corresponde al porcentaje de mucílago, la segunda al porcentaje de agua.</b>	<b>67</b>
<b>Cuadro 5</b>	<b>Características micromorfológicas del suelo arcilloso y arenoso con diferentes dosis de mucílago de nopal.</b>	<b>71</b>
<b>Cuadro 6</b>	<b>Tratamientos aplicados al suelo arcilloso, para la primera columna tenemos que: T= Tratamiento, la primera cantidad corresponde al porcentaje de mucílago, la segunda al porcentaje de agua.</b>	<b>100</b>
<b>Cuadro 7</b>	<b>Tratamientos aplicados al suelo arenoso, para la primera columna tenemos que: T= Tratamiento, la primera cantidad corresponde al porcentaje de mucílago, la</b>	<b>101</b>

	<b>segunda al porcentaje de agua.</b>	
<b>Cuadro 8</b>	<b>Distribución del tamaño de partícula sin mucílago de nopal, con sus respectivos porcentajes.</b>	<b>106</b>
<b>Cuadro 9</b>	<b>Estabilidad de los agregados en húmedo en suelo arcilloso.</b>	<b>108</b>
<b>Cuadro 10</b>	<b>Estabilidad de los agregados en húmedo para el suelo con textura arenosa.</b>	<b>111</b>
<b>Cuadro 11</b>	<b>Estabilidad estructural (%) para el suelo arcilloso.</b>	<b>114</b>
<b>Cuadro 12</b>	<b>Estabilidad estructural (%) para el suelo arenoso.</b>	<b>114</b>
<b>Cuadro 13</b>	<b>Comportamiento del carbono orgánico de los tratamientos empleados a través de los muestreos realizados en suelo arcilloso y arenoso.</b>	<b>125</b>
<b>Cuadro 14</b>	<b>Comportamiento del nitrógeno total de los tratamientos empleados a través de los muestreos realizados en suelo arcilloso.</b>	<b>130</b>
<b>Cuadro 15</b>	<b>Comportamiento de la relación C/N de los tratamientos empleados a través de los muestreos realizados en suelo arcilloso.</b>	<b>135</b>

## Índice de figuras

<b>Figura</b>		<b>Página</b>
<b>Figura 1</b>	<b>Plantación de nopal, ubicada en Texcoco.</b>	<b>33</b>
<b>Figura 2</b>	<b>Extractor casero utilizado para la extracción del mucilago de nopal.</b>	<b>34</b>
<b>Figura 3</b>	<b>Perfil de humedecimiento del suelo arcilloso con las constantes de humedad, capacidad de campo (CC) y punto de marchitamiento permanente con la humedad aprovechable y no aprovechable.</b>	<b>35</b>
<b>Figura 4</b>	<b>Perfil de humedecimiento del suelo arenoso con las constantes de humedad, capacidad de campo (CC) y punto de marchitamiento permanente con la humedad aprovechable y no aprovechable.</b>	<b>36</b>
<b>Figura 5</b>	<b>Valores de temperaturas máximas, mínimas y ambiental diaria en invernadero con cultivo de trigo establecido.</b>	<b>39</b>
<b>Figura 6</b>	<b>Cantidad de agua (mL) aplicada al cultivo de trigo en su ciclo vegetativo, en suelo con textura arcillosa y arenosa, bajo condiciones de invernadero.</b>	<b>41</b>
<b>Figura 7</b>	<b>Altura de planta (cm) para el cultivo de trigo en suelo de textura arcillosa y arenosa bajo condiciones de invernadero.</b>	<b>43</b>
<b>Figura 8</b>	<b>Número de hojas, para el cultivo de trigo en suelo de textura arcillosa y arenosa, bajo condiciones de invernadero.</b>	<b>45</b>
<b>Figura 9.</b>	<b>Peso seco de grano (g), para el cultivo de trigo en suelo de textura arcillosa y arenosa bajo condiciones de invernadero.</b>	<b>47</b>
<b>Figura 10</b>	<b>Número de semillas o granos para el cultivo de trigo en suelo de textura arcillosa y arenosa bajo condiciones de invernadero.</b>	<b>50</b>
<b>Figura 11</b>	<b>Materia seca (g) para el cultivo de trigo en suelo de textura arcillosa y arenosa bajo condiciones de invernadero.</b>	<b>53</b>
<b>Figura 12</b>	<b>Perfil de humedecimiento del suelo arcilloso con las constantes de humedad, capacidad de campo (CC) y punto de marchitamiento permanente con la humedad aprovechable y no aprovechable.</b>	<b>65</b>

<b>Figura 13</b>	<b>Perfil de humedecimiento del suelo arenoso con las constantes de humedad, capacidad de campo (CC) y punto de marchitamiento permanente con la humedad aprovechable y no aprovechable.</b>	<b>66</b>
<b>Figura 14</b>	<b>Cajas magenta con 200 g de suelo: a) suelo arenoso y b) suelo arcilloso. Utilizadas para los diferentes tratamientos de mucílago de nopal y su humedecimiento gradual.</b>	<b>67</b>
<b>Figura 15</b>	<b>Cámara de ambiente controlado ubicada en el Postgrado de Botánica del C.P. Montecillo. Méx.</b>	<b>68</b>
<b>Figura 16</b>	<b>Láminas delgadas (4x) de suelo arcilloso, muestreo a los siete días después de la aplicación del mucílago de nopal. Tratamientos: a) testigo, b) tratamiento 10-90, c) tratamiento 40-60 y d) tratamiento 80-20. La primera cantidad corresponde mucílago de nopal (%) y la segunda a la del agua (%).</b>	<b>72</b>
<b>Figura 17</b>	<b>Láminas delgadas (4x) de suelo arenoso, realizado a los siete días después de la aplicación del mucílago de nopal para cada uno de los tratamientos: a) testigo, b) tratamiento 10-90, c) tratamiento 40-60 y d) tratamiento 80-20. La primera cantidad corresponde mucílago de nopal (%) y la segunda a la del agua (%).</b>	<b>77</b>
<b>Figura 18</b>	<b>Láminas delgadas (4x) para suelo arcilloso a los 14 días después de la aplicación del mucílago de nopal para cada uno de los tratamientos: a) testigo, b) tratamiento 10-90, c) tratamiento 40-60 y d) tratamiento 80-20. La primera cantidad corresponde mucílago de nopal (%) y la segunda a la del agua (%).</b>	<b>80</b>
<b>Figura 19</b>	<b>Láminas delgadas (4x) para suelo arenoso, muestreo dos a los 14 días después de la aplicación del mucílago de nopal para cada uno de los tratamientos: a) testigo, b) tratamiento 10-90, c) tratamiento 40-60 y d) tratamiento 80-20. La primera cantidad corresponde mucílago de nopal (%) y la segunda a la del agua (%).</b>	<b>83</b>

<b>Figura 20</b>	<b>Láminas delgadas (4x) de suelo arcilloso, a los 21 días después de la aplicación del mucílago de nopal para cada uno de los tratamientos: a) testigo, b) tratamiento 10-90, c) tratamiento 40-60 y d) tratamiento 80-20. La primera cantidad corresponde mucílago de nopal (%) y la segunda a la del agua (%).</b>	<b>85</b>
<b>Figura 21</b>	<b>Láminas delgadas (4x) de suelo arenoso, a los 21 días después de la aplicación del mucílago de nopal para cada uno de los tratamientos: a) testigo, b) tratamiento 10-90, c) tratamiento 40-60 y d) tratamiento 80-20. La primera cantidad corresponde mucílago de nopal (%) y la segunda a la del agua (%).</b>	<b>88</b>
<b>Figura 22</b>	<b>Cajas magenta con 200 g de suelo: a) suelo arenoso y b) suelo arcilloso para los diferentes tratamientos de mucílago de nopal y su humedecimiento gradual.</b>	<b>99</b>
<b>Figura 23</b>	<b>Perfil de humedecimiento del suelo arcilloso con las constantes de humedad, capacidad de campo (CC) y punto de marchitamiento permanente con la humedad aprovechable y no aprovechable</b>	<b>100</b>
<b>Figura 24.</b>	<b>Perfil de humedecimiento del suelo arenoso con las constantes de humedad, capacidad de campo (CC) y punto de marchitamiento permanente con la humedad aprovechable y no aprovechable.</b>	<b>101</b>
<b>Figura 25.</b>	<b>Cámara de ambiente controlado ubicada en el Postgrado de Botánica del C.P. Montecillo. Méx.</b>	<b>102</b>
<b>Figura 26</b>	<b>Estabilidad de diferentes tamaños de agregados para el suelo de textura arcillosa; tres en muestreos y los diferentes tratamientos evaluados.</b>	<b>109</b>
<b>Figura 27</b>	<b>Estabilidad de diferentes tamaños para el suelo de textura arenosa, considerando tres muestreos y los tratamientos evaluados.</b>	<b>112</b>
<b>Figura 28</b>	<b>Estabilidad estructural para suelo de textura: a) arcillosa y b) arenosa. Para cada uno de los tratamientos y muestreos empleados.</b>	<b>114</b>
<b>Figura 29</b>	<b>Comportamiento del carbono orgánico en los tratamientos empleados a través de tres muestreos en suelo arcilloso y arenoso.</b>	<b>126</b>

<b>Figura 30</b>	<b>Comportamiento del nitrógeno total en los tratamientos empleados a través de tres muestreos en suelo arcilloso y arenoso.</b>	<b>130</b>
<b>Figura 31</b>	<b>Comportamiento de la relación carbono/ nitrógeno en los tratamientos empleados a través de tres muestreos en suelo arcilloso y arenoso.</b>	<b>135</b>

## MUCÍLAGO DE NOPAL (*Opuntia spp.*) SOBRE PROPIEDADES MICROMORFOLÓGICAS Y ESTRUCTURALES DEL SUELO EN TRIGO

Braulio García Favela, Dr.  
Colegio de Postgraduados, 2013.

### RESUMEN

Se utilizó mucílago de nopal (*Opuntia spp.*), para evaluar el rendimiento de trigo. Se utilizó un suelo arcilloso y otro arenoso. Los tratamientos para ambos suelos fueron: T1=0-0 (Testigo) sin mucílago, solamente con agua, T2=10-90, T3=20-80, T4=30-70, T5=40-60, T6=50-50, T7=60-40, T8=70-30 y T9=80-20. T representa Tratamiento, el primer número la cantidad de mucílago (%) y el segundo número la cantidad de agua (%), se distribuyeron en un diseño completamente al azar con nueve repeticiones. Las variables medidas fueron: altura de planta, número de hojas, peso de grano, número de semillas o granos, materia seca y cantidad de agua consumida por el cultivo de trigo a lo largo de su ciclo. Para el suelo con textura arcillosa los mejores resultados con diferencias significativas se obtuvieron con el tratamiento T5=40-60 para las variables: consumo de agua, número de hojas, peso de grano, número de granos y materia seca. Mientras que, para el T7=60-40, estos fueron para el consumo de agua, altura de planta y número de hojas, y por último, con el tratamiento T9=80-20 solamente se obtuvo el mejor resultado con el consumo de agua. Los resultados sobresalientes en el suelo arenoso, que mostraron diferencias estadísticas significativas fueron las variables altura de planta, número de hojas y materia seca para el tratamiento T8=70-30. Mientras que para el tratamiento T9=80-20, estos fueron en las variables, peso de grano, número de granos y consumo de agua.

Otro estudio consistió en evaluar cuatro dosis de mucílago de nopal, para observar sus efectos en la microestructura del suelo. Los tratamientos fueron: T1= Testigo (sin mucílago, únicamente con agua), T2= 10-90, T3=40-60 y T4=80-20. Se realizaron tres muestreos de suelo a los 7, 14 y 21 días después de la aplicación del mucílago. Se evaluó a nivel micromorfológico considerando los componentes básicos o las unidades

más simples en secciones delgadas. Los resultados para el suelo arcilloso indican cambios microestructurales en los tres tiempos de muestreo (7, 14 y 21 días), mientras que en el suelo arenoso no se observa cambio alguno.

Para el último ensayo se utilizaron los mismos tratamientos que en el experimento anterior y se evaluó: estabilidad de agregados, estabilidad estructural, carbono orgánico, nitrógeno total y relación C/N. Los tratamientos se colocaron en una cámara de ambiente controlado a una temperatura de 25 °C y humedad relativa de 40%. Se realizaron tres muestreos a los 7, 14 y 21 días después de la aplicación del mucílago. . En el suelo arcilloso el tratamiento T80-20, presentó los valores más altos en la estabilidad de los agregados, en los tamaños >4.76, 3.36, 2.0, 1.0 y 0.5 mm. De igual manera se observó en el tratamiento T40-60 en los tamaños de agregados >4.76, 1.0 y 0.5 y 0.25 mm. En las propiedades estabilidad estructural y contenido de nitrógeno total el tratamiento T80-20 presentó los valores más altos en los tres muestreos realizados. Para el suelo arenoso en la estabilidad de agregados, el tratamiento T40-60 presentó los valores más altos en agregados >4.76, 3.36, 2.0, 1.0, 0.5 y 0.25, seguido por el tratamiento T80-20 en tamaño de agregados >4.76, 3.36, 2.0, 1.0, 0.5. En las propiedades estabilidad estructural y contenido de carbono orgánico el mejor tratamiento fue el T40-60. En cuanto al contenido de nitrógeno total, el mejor tratamiento fue el T10-90, mientras que para la relación carbono/nitrógeno fue el tratamiento T80-20.

**Palabras clave:** *mucílago, secciones delgadas, agregación.*

**Cactus mucilage (*Opuntia* spp.) MICROMORPHOLOGICAL AND  
STRUCTURAL PROPERTIES OF SOIL IN WHEAT**

**Braulio García Favela, Dr.  
Colegio de Postgraduados, 2013.**

**SUMMARY**

Mucilage was used cactus (*Opuntia* spp.), To evaluate the performance of wheat. Was used and a sandy clay soil. For both soil treatments were: T1 = 0-0 (control) without mucilage, just water, T2 = 10-90, T3 = 20-80 = 30-70 T4, T5 = 40-60, T6 = 50 - 50 = 60-40 T7, T8 and T9 = 70-30 = 80-20. T represents treatment, the first number the amount of mucilage (%) and the second number the amount of water (%), were distributed in a completely randomized design with nine replications. The variables measured were: plant height, leaf number, grain weight, number of seeds or grains, dry matter and amount of water consumed by the crop of wheat throughout your cycle. For clayey soil with the best results were obtained with significant differences with treatment T5 = 40-60 for the variables: water consumption, number of leaves, grain weight, grain number and dry matter. While, for the T7 = 60-40, these were for the consumption of water, plant height and number of leaves, and finally, with the treatment T9 = 80-20 only the best result was obtained with water consumption. Outstanding results in the sandy soil, which showed statistically significant differences were plant height, number of leaves and dry matter for the treatment T8 = 70-30. While treatment T9 = 80-20, these variables were, grain weight, number of grains and water consumption. Another study was to evaluate four doses of cactus mucilage, to observe their effects on soil microstructure. The treatments were: T1 = Control (without mucilage with water only), T2 = 10-90, T3 = T4 = 40-60 and 80-20. There were three samples of soil at 7, 14 and 21 days after application of mucilage. Micromorphologic level was evaluated considering the basic components and simpler units in thin sections. The results for the clay soil indicate microstructural changes in the three sampling times (7, 14 and 21 days) while in the sandy soil was not observed any change. For the latter assay were used the same treatments as in the previous experiment and evaluated: aggregate stability,

structural stability, organic carbon, total nitrogen and C / N. Treatments were placed in a controlled environment chamber at a temperature of 25 ° C and 40% relative humidity. Three samplings were performed at 7, 14 and 21 days after application of mucilage. . In clay soil treatment T80-20 showed the highest values in the stability of aggregates, in the sizes > 4.76, 3.36, 2.0, 1.0 and 0.5 mm. Similarly observed in T40-60 treatment in the aggregate sizes > 4.76, 1.0 and 0.5 and 0.25 mm. In structural stability properties and total nitrogen content of T80-20 treatment showed the highest values in the three samplings. For sandy soil aggregate stability, treatment T40-60 showed the highest values in aggregates > 4.76, 3.36, 2.0, 1.0, 0.5 and 0.25, followed by treatment T80-20 aggregate size > 4.76, 3.36 , 2.0, 1.0, 0.5. In the properties of structural stability and organic carbon content the best treatment was the T40-60. Regarding the total nitrogen content, the best treatment was T10-90, while for the carbon / nitrogen ratio was T80-20 treatment.

Keywords: mucilage, thin sections aggregation.

## I. INTRODUCCIÓN

La estructura del suelo surge como una consecuencia de las interacciones de la fase sólida (minerales y materia orgánica), líquida y gaseosa, un proceso que a menudo se describe como agregación del suelo. Las fuerzas físicas como humedecimiento y secado, congelamiento y descongelamiento causan la contracción y la hinchazón del suelo, trayendo como consecuencia la fracturación y el desarrollo de espacios dentro del suelo. Una consecuencia natural de esto, es que el desarrollo de las redes de poros en el tiempo, varía ampliamente en sus dimensiones. Dado que la red de poros regula el movimiento y la dinámica de los gases, líquidos, solutos, partículas, organismos y la mayoría de los procesos del suelo, la estructura juega un papel fundamental en el gobierno de muchas funciones del suelo.

La estructura es a menudo expresada como el grado de estabilidad de los agregados del suelo (Six *et al.*, 2004). La importancia y la naturaleza de los materiales orgánicos asociados con cada nivel de agregación varían. En la escala de paquetes de arcillas, la agregación está principalmente dictada por las propiedades mineralógicas y químicas del suelo. La unión de los paquetes de arcilla para formar microagregados se produce a través de una serie de mecanismos.

El mucílago de nopal (*Opuntia* spp.), está constituido por una gran cantidad de polisacáridos similares a los que participan como agentes de unión en la agregación del suelo. La agregación está dictada principalmente por las propiedades mineralógicas y químicas del suelo, ya que se presenta de manera diferente en un suelo arcilloso que en un suelo arenoso. El mecanismo dominante que se ha propuesto implica cementantes a base de polisacáridos (mucílagos o mucigeles) producidos por las raíces de plantas y microorganismos del suelo (Ladd *et al.*, 1996).

Los efectos del mucílago de nopal en las propiedades del suelo no se han estudiado. Este estudio pretende probar la hipótesis de que la aplicación de mucílago de nopal puede incrementar la agregación del suelo. Durante la investigación se

realizaron tres experimentos utilizando un suelo con textura arenosa y uno con textura arcillosa, el primero se llevó a cabo en vasos de unicel, en donde se sembró trigo para evaluar la cantidad de agua consumida y algunos componentes de rendimiento; número de hojas, altura de planta, peso de grano, número de semillas y materia seca. Se aplicaron 9 tratamientos; el testigo con una aplicación de 100% de agua, el segundo con 10% de mucílago y 90% de agua, el tercero con 20% de mucílago y 80% de agua, el cuarto con 30% de mucílago y 70% de agua, el quinto con 40% de mucílago y 60% de agua, el sexto con 50% de mucílago y 50% de agua, el séptimo con 60% de mucílago y 40% de agua, el octavo con 70% de mucílago y 30% de agua y el noveno con 80% de mucílago y 20% de agua. El diseño experimental fue completamente al azar con tres repeticiones.

En base al primer experimento se eligieron los siguientes tratamientos: el primero con 10% de mucílago y 90% de agua, el segundo con 40% de mucílago y 60% de agua, el tercero con 80% de mucílago y 20% de agua y el testigo. Se utilizaron cajas magenta como unidades experimentales con 200g de suelo con textura arenosa en un diseño completamente al azar, del mismo modo para el suelo con textura arcillosa. Las cajas se colocaron en una cámara de ambiente controlado a una temperatura constante de 25 °C y una humedad relativa de 40%. En el transcurso del experimento se realizaron tres muestreos a los 7, 14 y 21 días después de la aplicación de mucílago para llevar las cajas tanto del suelo arenoso como del suelo arcilloso al laboratorio para obtener las láminas delgadas y evaluar a nivel micromorfológico los componentes básicos o las unidades más simples en secciones delgadas, como lo son: componentes minerales, masa basal, color de la masa, huecos, agregación y tipo de microestructura.

Se utilizó el mismo diseño experimental y los mismos tratamientos en un tercer experimento dentro de una cámara de ambiente controlado a 25 °C y una humedad relativa de 40%. Se realizaron tres muestreos a los 7, 14 y 21 días después de la aplicación de mucílago y se evaluaron: la estabilidad de agregados, estabilidad estructural, carbono orgánico, nitrógeno total y la relación carbono/nitrógeno para ambos tipos de suelo.

## II. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Los nopales

El nopal (*Opuntia ficus-indica*) pertenece a la familia *Cactaceae*, siendo las cactáceas especies endémicas del continente americano que se desarrollan principalmente en las regiones áridas y semiáridas (Flores *et al.*, 1995). El centro primitivo de diferenciación de las cactáceas fue el Golfo de México y el Caribe, desde donde emigraron para constituir las dos zonas geográficas actuales: América del Norte y América del Sur.

La taxonomía de los nopales es sumamente compleja, debido a múltiples razones, entre las que destaca el hecho de que los fenotipos presentan gran variabilidad según las condiciones ambientales. Además, es frecuente encontrar casos de poliploidía, ya que se reproducen en forma sexual o asexual y existen numerosos híbridos interespecíficos, lo que complica aún más su clasificación (Sáenz, 2006). La nomenclatura científica del nopal es la siguiente:

Reino: *Plantae*

División: *Magnoliophyta*

Clase: *Magnoliopsida*

Orden: *Caryophyllales*

Familia: *Cactaceae*

Tribu: *Opuntiae*

Género: *Opuntia*

Especie: *Opuntia ficus-indica* Mill.

### 2.2. Variedades cultivadas

Del género *Opuntia* hay sólo 10 ó 12 especies hasta ahora utilizadas por el hombre, entre las que se encuentran como especies cultivadas, *Opuntia ficus-indica*, *O. amyclaea*, *O. xoconostle*, *O. megacantha*, *O. streptacantha* y como especies silvestres: *Opuntia hyptiacantha*, *O. leucotricha* y *O. robusta*. La más ampliamente cultivada en distintas partes del mundo es *Opuntia ficus-indica*. Las características de

estas especies son variables, diferenciándose en la forma de los cladodios, en la presencia o ausencia de espinas, en el tamaño y color de los frutos, entre otras (Barrientos, 1983).

*Opuntia ficus-indica* puede diferenciarse de todos los otros miembros del género por presentar la combinación de las siguientes características: cladodios usualmente elípticos y de gran tamaño, carentes total o casi totalmente de espinas; con frutos grandes, dulces y carnosos por encontrarse exclusivamente en ambientes modificados. Las variedades se diferencian principalmente en cuatro grupos, por el color de la cáscara y la pulpa del fruto: cáscara verde amarilla y pulpa blanca, cáscara amarilla anaranjada y pulpa naranja, cáscara verde-roja y pulpa roja; y cáscara roja y pulpa púrpura (Álvarez, 2007).

## **2.3. Descripción de la planta**

### **2.3.1. La raíz**

El sistema radical del nopal es muy extenso y superficial, alcanzando una profundidad cercana a los 80 cm, pero se extiende horizontalmente por varios metros. Es un sistema densamente ramificado, rico en raíces finas absorbentes y superficiales (Sudzuki, 1999; Sáenz, 2006).

### **2.3.2. El tallo**

Los nopales presentan numerosos tallos modificados denominados cladodios (conocidos vulgarmente como “paletas” o “pencas”). Los cladodios tienen forma ovoide, elíptica u oblonga, similar a una raqueta de tenis; alcanzan una longitud de 33-60 cm y 18-25 cm de ancho; son aplanados, con un grosor de 1.8-2.3 cm; color verde pálido a oscuro, con o sin espinas dependiendo de la variedad. Los cladodios están unidos unos a otros, formando numerosas ramificaciones que pueden llegar a alcanzar una altura de 3 a 5 m. Además, están colocados de tal forma, que aprovechan al máximo la luminosidad, por lo que los cladodios que crecen en invierno tienen una orientación diferente de los que crecen durante el verano. Sobre ambas caras del cladodio hay yemas, llamadas “aréolas”, que tienen la capacidad de desarrollar nuevos

cladodios, flores y raíces dependiendo de las condiciones ambientales. Las aréolas presentan en su cavidad espinas de dos tipos: unas pequeñas, agrupadas en gran número (conocidas como “gloquidios” o ahuates), y otras grandes que son hojas modificadas. Los cladodios desarrollados tienen 52-69 areolas por cada cara. La epidermis del nopal está cubierta de una gruesa cutícula que la protege de una amplia gama de insectos y patógenos y evita la deshidratación provocada por las altas temperaturas. Además, la cutícula es de color blanquecino, lo que le permite reflejar gran parte de la radiación, evitando el calentamiento excesivo del vegetal. Es así como puede tolerar temperaturas de hasta 60°C. La cutícula está interrumpida por la presencia de estomas, los que permanecen cerrados durante el día para evitar la deshidratación. Los tallos se lignifican con el tiempo y pueden llegar a transformarse en verdaderos tallos leñosos, agrietados, de color ocre blanquizco a grisáceo (Sudzuki *et al.*, 1993; Granados y Castañeda, 1996; Reyes-Agüero *et al.*, 2005; Sáenz, 2006; Álvarez, 2007).

En las pencas, de color verde opaco, se realiza la fotosíntesis, pues éstas remplazan a las hojas con esa función. Se encuentran protegidas por una cutícula gruesa que, en ocasiones, está cubierta de cera o pelos que disminuyen la pérdida de agua, ya que poseen abundante parénquima. En este tejido se almacenan considerables cantidades de agua lo que permite a las plantas soportar largos periodos de sequía. Cabe destacar el papel de los mucílagos (hidrocoloides presentes en este tejido) que tienen la capacidad de retener el agua (Nobel *et al.*, 1992).

### **2.3.3. Corteza y médula**

La epidermis constituye la capa más externa de células en el cuerpo de los cactus. Una capa protectora continua con pequeños huecos llamados estomas. Debajo de la epidermis está el colénquima, que constituye el tejido entre el hipodermo y el anillo de los haces vasculares. El colénquima de *Opuntia* es grueso y succulento y consiste de una corteza primaria formada por una masa homogénea de células de parénquima; contiene clorofila en la parte externa y está arreglada en hileras radiales largas para formar un clorénquima de empalizada prominente, similar a la de la palizada de una hoja. La parte interna es blanca y formada de células parenquimatosas

esferoides, similares a las del mesó filo esponjoso. Las partes verdes (clorénquima) y blanca (parénquima) contienen idioblastos conteniendo mucílago o cristales más pequeños que los de las células epidermales. Mientras que la parte verde que contiene los cloroplastos tiene la función principal de fotosintetizar, la parte blanca es más que una simple bolsa almacenadora de agua, ya que es la fábrica química donde se producen las hormonas, alcaloides y otros compuestos (como fármacos), formados durante el metabolismo de la planta (Mauseth, 1984; Sajeva y Mauseth, 1991). Sin tener cloroplastos, la parte blanca contiene otros organelos como amiloplastos (para almacenamiento de granos de almidón) y está hecho de un tejido homogéneo parenquimatoso con pequeños espacios intercelulares.

#### **2.3.4 Origen y distribución geográfica**

La planta del nopal se distribuye en América, siendo México el país con mayor abundancia de especies, por lo que se puede considerar como centro de origen y diversidad de esta especie. (Goldstein y Nobel, 1991). Actualmente en México, la producción de nopal puede clasificarse en tres tipos: nopaleras silvestres, huertos familiares y plantaciones. La producción en nopaleras, en su gran mayoría silvestres, se estima en 3 millones de hectáreas, distribuidas en 15 estados del país. El 52,5% de superficie nacional está ocupada por zonas áridas y semiáridas y ya que las condiciones climáticas que prevalecen en éstas impiden la producción de otros cultivos, el nopal se convierte en una de las alternativas económicas más viables para sus habitantes (Saravia-Tasayco, 2004).

#### **2.3.5. Usos del nopal y mucílago**

##### **En el México antiguo**

El nopal (*Opuntia spp.*) ha representado, para los mexicanos, en su desarrollo histórico, uno de los elementos bióticos más relevantes y de mayor significado cultural, ya que se utiliza como alimento (verdura o fruto), bebida alcohólica, dulce, forraje, cerco vivo, producto industrial, etc. Su valor cultural y biótico ha quedado plasmado en códices, pinturas y bibliografías antiguas; su significado histórico es evidente.

El mucílago de nopal de algunas especies, es tan pegajoso, que las personas que viven en comunidades rurales lo emplean como pegamento; llegó a ser tan importante ese uso que se industrializó en el sur de los Estados Unidos. Diego Rivera y Javier Guerrero, pintores mexicanos, emplearon en su técnica, la baba de nopal. Como ejemplo, se encuentran los murales de la Secretaría de Educación Pública (Blanco, 1966).

### **En la restauración y conservación de edificios históricos**

En México se ha utilizado el mucílago de nopal en combinación con cal porque aumenta sus propiedades adhesivas y mejora su repelencia al agua. Por sus propiedades adhesivas, se ha usado de forma similar al yeso en paredes de adobe y ladrillo y también como una barrera al agua en el estuco.

Cárdenas *et al.* (1998) han señalado que desde hace muchos siglos se agrega jugo de nopal como adhesivo orgánico a la cal, para restaurar y proteger edificios históricos en México. Un estudio realizado por éstos autores, probó la adición de jugo de nopal (extraído de pencas hervidas) a la cal ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) en proporciones diferentes (0,65, 1,0 y 1,95%); la resistencia de las pastas secas fue evaluada por una prueba penetración-ruptura con un texturómetro. A medida que la cantidad de jugo de nopal aumentaba, se produjo una reducción drástica del estrés máximo y de la tasa de deformación, comparado con un testigo (sin jugo de nopal); en cambio, la cal control mostró una estructura mecánica más homogénea en la muestra con la dosis más baja de jugo de nopal (0,65%). También, se observó que el mucílago tenía un bajo efecto en la continuidad de la red, haciendo una fase más discontinua y la red de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  más débil. Cuando la proporción de jugo de nopal aumentaba, las propiedades mecánicas también aumentaron debido a la formación de una red homogénea en la que el mucílago de nopal inter penetraba en el hidróxido de calcio, sin modificar la estructura, comparado con el control.

### **En la elaboración de adobes**

Los nopales contienen sustancias viscosas generalmente conocidas como mucílago o hidrocoloide, que está constituido por carbohidratos de alto peso molecular. Contiene principalmente dos polímeros naturales orgánicos: amilasa (polímero de la glucosa con unión 1-4 de tipo  $\alpha$  consigo misma) y amilopectina (polímero también de la glucosa, pero con uniones 1-6). La amilasa se encuentra formando una cadena helicoidal que en solución tiene la capacidad de formar películas delgadas que, al secar, presentan alta rigidez. La amilopectina, como todo compuesto de alto peso molecular, presenta viscosidad elevada en estado puro, pero es altamente soluble en agua. Combinadas y encontrándose en solución acuosa, ambas pueden formar capas con diferentes propiedades mecánicas, éstas características de cohesión se han aprovechado para unir diferentes materiales. De ésta manera, encontrándose en solución acuosa, ofrecerá a cualquier concentración diferente de cero ciertas características de cohesión (Masschelein-Kleiner, 1995).

El efecto de cohesión ha sido aprovechado desde la antigüedad, principalmente para la elaboración de adobe para la construcción. Tiene la ventaja de que, ya que el mucílago se encuentra en baja proporción en dilución, no se presentan problemas durante su incorporación a la mezcla de materiales para obtener adobe o bloques de tierra comprimida terminados y durante siglos se han observado de manera empírica grandes ventajas al hacer uso de éste.

### **En la producción de abono orgánico**

La conservación de la fracción orgánica del suelo cultivado es uno de los principales problemas de la agricultura, sobre todo en los sistemas de producción intensiva. Para compensar estas pérdidas se requieren necesariamente aportes orgánicos periódicos de 2-6 ton/ha/año, según se trate de materiales orgánicos frescos o previamente estabilizados. Sin embargo, el acondicionamiento de suelos con residuos orgánicos frescos es un manejo poco recomendable debido al alto volumen que se debe manejar y al tiempo que estos requieren para estabilizarse y posibilitar su uso más eficiente. La diferencia que existe entre la aplicación directa de residuos

frescos como rastrojos de cosechas y estiércol y la aplicación de materiales orgánicos bioprocesados, tiene relación con la respuesta que se puede obtener a corto plazo con el establecimiento de un cultivo. Los residuos orgánicos se degradan mediante una oxidación bioquímica, generando CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O, energía calórica y materia orgánica estabilizada. Dentro de este tipo de proceso se encuentran el compostaje y el lombricompostaje (Varnero, 2001).

En el caso de que el material proveniente de la poda de nopal no se utilice para nuevas plantaciones o que no reúna las características deseadas para tal fin, se sugiere utilizarlo para la obtención de abono orgánico o para la alimentación del ganado. En los tres años de las experiencias realizadas en la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de Chile, los bioabonos no produjeron cambios significativos en propiedades físicas del suelo; sin embargo, al comparar con el tratamiento testigo, existió una tendencia a aumentar el agua aprovechable, aumentar la velocidad de infiltración y a disminuir la densidad aparente (Varnero y García de Cortazar, 1998). Estos cambios, si bien son positivos para el funcionamiento del cultivo, no alcanzan la magnitud suficiente para explicar los cambios de rendimiento observados. Éstos están más relacionados con la disponibilidad de nutrimentos. Es probable que en un plazo de 5 a 10 años o en suelos pobres en materia orgánica, se puedan apreciar diferencias significativas en las propiedades físicas del suelo con la incorporación de bioabonos.

### **En la infiltración del agua en el suelo**

Algunos polisacáridos naturales puede producir resultados similares a las poliácridamidas (PAM) (Wallace, 1986), y puede ser más conveniente su uso (Ben-Hur, 1994). Al examinar el nopal como materia prima para usos comerciales, Saag *et al.* (1975) encontraron que los polisacáridos en el mucílago contienen los azúcares ramnosa, arabinosa, galactosa y xilosa. Llegaron a la conclusión de que los polisacáridos en *Opuntia* son similares a la pectina. Cárdenas *et al.* (1998) confirmó que las formas de mucílago de nopal, son grandes polisacáridos, como la pectina soluble en agua, y especuló que mediante la promoción de la floculación puede funcionar como un clarificador de agua. Retamal *et al.* (1987), dividiendo los

carbohidratos en azúcares libres o almidones, encontró variación en los niveles de carbohidratos de los cladodios debido en las diferentes estaciones del año.

## **2.4. El mucílago de nopal**

Los cladodios del nopal (*Opuntia* spp.) y en menor grado sus frutos, son fuentes naturales de polisacáridos estructurales (Cárdenas *et al.*, 1999; Sáenz, 2002). *O. ficus-indica* es una de las especies más estudiadas (Cárdenas *et al.*, 1999). La presencia de mucílago y acidez en nopalitos, de semillas y mucílago en los frutos, afecta la aceptabilidad de los consumidores, principalmente en países distintos de México (Razo y Sánchez, 2002; Huerta y Montes, 2003; Corrales *et al.*, 2004). De acuerdo con Nobel (1986), el mucílago *O. ficus-indica* es un hetero-polisacárido de alto peso molecular, puede tener cerca de 30.000 sub-unidades de arabinosa (35 a 45%), galactosa (20 a 25%), ramnosa (7 a 8%), xilosa (7-8%) y ácido galacturónico (19 a 31%) y las moléculas de mucílago tienen numerosas cargas negativas, que unen al  $Ca^{2+}$ , al igual que la pectina. En cambio, Cárdenas *et al.* (1999) indicaron que el mucílago de cladodios de *O. ficus-indica* es un arabinogalactano ramificado, que presenta una fracción sin carga (55%), compuesta por residuos de arabinosa (42,5%), galactosa (29%), glucosa (2,5%) y xilosa (26 %). Sugirió que esta composición química es similar a las zonas ramificadas de la pectina. Es probable que los mucílagos y pectinas, debido a su composición similar, podrían coextraerse, dependiendo de la metodología utilizada y de los tejidos vegetales analizados.

### **2.4.1. Solubilidad del mucílago de *Opuntia ficus indica***

Los polisacáridos obtenidos de las plantas se hinchan cuando se sumergen en agua o en algunos casos forman suspensiones coloidales muy viscosos o masas gelatinosas (Sáenz y Montoya, 1999). El género *Opuntia* de la familia de las cactáceas, se caracteriza por producir un hidrocoloide que se asemeja a una red, una estructura capaz de sostener grandes cantidades de agua (McGarvie y Parolis, 1979; Ting, 1997). Varios estudios sobre su estructura y composición se han sido reportados, informando que se trata de una sustancia polimérica compleja y ramificada, que contiene restos de L-arabinosa, D-galactosa, ácido D-galacturónico, L-ramnosa y D-xilosa y (McGarvie y

Parolis, 1981 ; Cárdenas *et al.*, 1997; Medina Torres *et al.*, 2000; Goycoolea y Cárdenas, 2003; Sáenz *et al.*, 2004; Snyman *et al.*, 2004; Duru y Turker, 2005; Matsuhira *et al.*, 2006; Sepúlveda *et al.*, 2007).

## **2.5. Sustancias no húmicas**

Incluye todas aquellas con características químicas aun reconocibles, como los carbohidratos, proteínas, péptidos, aminoácidos, ácidos nucleicos, purinas, pirimidinas, ácidos grasos, ceras, resinas, pigmentos, asimismo otras sustancias orgánicas, como los carbohidratos o polisacáridos, por lo general, éstos compuestos son relativa y fácilmente degradados en los suelos y abarcan un período corto de vida.

### **2.5.1. Los carbohidratos o polisacáridos**

El mayor interés en el estudio de los carbohidratos comenzó a mediados de la década de 1940, cuando Martin (1945) estableció que ciertos productos pegajosos de origen bacterial, mostrados por Martin y Waksman (1940) para agregar una mezcla de suelo de arena-arcilla, fueron identificados como polisacáridos. Al mismo tiempo (Stacey y Barker, 1960; Haworth *et al.*, 1946; Geoghegan y Brian, (1946, 1948) iniciaron las investigaciones sobre los usos del dextrano bacterial y polisacáridos para mejorar la estructura del suelo y la retención de humedad, que se relaciona con la gran cantidad de polisacáridos contenidos en los cladodios de nopal.

Durante 1950 (Rennie *et al.* 1954 y Chester *et al.* 1957) en sus trabajos experimentales, encontraron una buena correlación entre una buena estructura del suelo con las gomas microbiales o polisacáridos. Para este tiempo, la creencia en el papel de los polisacáridos como estabilizadores de los agregados del suelo sufrió una fuerte sacudida. Sin embargo, cuando Mehta *et al.*, (1960) demostró que la estructura granular resistió la degradación después de haberse tratado con peryodato. Algunos investigadores, pensaron que el peryodato se adhirió a los enlaces entre dos átomos de carbón adyacentes y de ésta forma se unieran a los polisacáridos con las partículas del suelo. Greenland *et al.* (1962) sugirieron que la estabilidad de los gránulos tratados con peryodato, descritos por Mehta *et al.* (1960) fueron unidas por hifas de hongos y micelios, los cuales han resistido el peryodato. Los suelos también contienen

CaCO<sub>3</sub> que inhiben la dispersión de los agregados después de haberse tratado con peryodato (Clapp y Emerson, 1965a).

### **2.5.2. Los carbohidratos como componentes de la materia orgánica del suelo**

Los carbohidratos que se localizan en la materia orgánica del suelo (MOS), se encuentran como polisacáridos (Cheshire, 1979b). Tienen su origen en los residuos de plantas y animales, gomas extracelulares producidas por microorganismos y de sus tejidos celulares. De todos los componentes de la MOS, los carbohidratos son los más rápidamente disponibles para los microorganismos como fuente de alimento y energía. En los suelos, ellos parecen mejorar la agregación y la estabilidad estructural de las partículas del suelo, incrementar la capacidad de almacenamiento de agua, el intercambio iónico y formar complejos con metales (Cheshire, 1979b), lo que puede ser un efecto de la aplicación de mucílago de nopal al suelo, ya que está formado por grandes cantidades de polisacáridos.

### **2.6. La raíz y su importancia en la estructuración del suelo**

En general, la influencia de raíces y plantas sobre la estructura del suelo ha sido revisada por Angers y Caron (1998) y Degens (1997). Los procesos relacionados con la raíz, afectan la estructura del suelo y pueden ser agrupados en cinco categorías: (1) penetración de la raíz; (2) cambio en el régimen del agua en el suelo; (3) exudación de la raíz; (4) descomposición de raíces muertas y (5) enredo de raíz.

La acción de comprimir de las raíces en su desarrollo disminuye la porosidad del suelo en la zona que se encuentra entre las raíces y las partículas de arcilla reorientadas a lo largo de la superficie de la raíz (Dorioz *et al.*, 1993). Cerca de las superficies de las raíces, la densidad puede incrementarse de 12 a 35% comparada con la densidad del suelo en general (Young, 1998). Estas alteraciones ocurren principalmente dentro de una zona de 50-200  $\mu\text{m}$ , alrededor de la raíz, induciendo la formación de microagregados. En contraste, una disminución en la macroagregación después del desarrollo de la planta es parcialmente debido al efecto de la penetración de las raíces dentro de macroporos.

La penetración de la raíz disminuye la proporción macroagregados inestables relativamente, pero incrementa la proporción de microagregados estables relativamente.

Las raíces del suelo, también tienen influencia en la agregación a través de la modificación de la condición del agua en el suelo de varias formas. Primero, la absorción del agua por las plantas provoca el secado localizado del suelo, esto promueve la unión de los exudados de las raíces sobre las partículas de arcilla (Reid y Goss, 1982). Segundo, la exudación radical reduce la velocidad de humedecimiento por la oclusión de poros o por el incremento en la tortuosidad de poro, de esa manera, se reduce el movimiento de los agregados (Caron *et al.*, 1996). Tercero, el flujo preferencial del agua a lo largo de las raíces vivas debido a la presencia de una película de agua saturada a lo largo de las raíces.

Los mucílagos producidos por las raíces pueden unir de manera directa las partículas del suelo. La adición de extracto de mucilago de la raíz de maíz al suelo, conduce a una formación instantánea de agregados, fuera de cualquier interferencia de la actividad microbial (Morel *et al.*, 1991). Baldock y Kay (1987) encontraron que las raíces estabilizan los agregados a través de la exudación de materiales (principalmente polisacáridos) sensibles a destrucción de peryodato. No obstante, estos materiales no podrían tener la misma importancia en todos los incrementos en la agregación del suelo inducidos por las raíces de las plantas. Traore *et al.* (2000) encontraron que podrían imitar las influencias de mucilagos solubles en la formación de agregados, utilizando una mezcla de glucosa, aminoácidos y ácidos orgánicos.

El grado de influencia por raíces sobre la estructura del suelo a través de la exudación de la raíz es muy variable, así como la producción y composición de los mucilagos depende de: (1) del régimen del agua; (2) de la especie de planta; (3) el tiempo y (4) la profundidad del suelo (Merbach *et al.*, 1999).

Se han hecho varios intentos para separar los efectos de las raíces de forma directa e indirecta, hifas y sus exudados sobre la formación y estabilización de macroagregados (Miller y Jastrow, 1990; Jastrow *et al.*, 1998; Bearden y Petersen, 2000; Rillig *et al.*, (2002a). Bearden y Petersen (2000) concluyeron que los mecanismos de estabilización de agregados dependen del tamaño de los agregados. Mientras que la formación de agregados entre 1 y 2 mm fue asociado con la longitud de las hifas y no con el crecimiento de la raíz, las raíces e hifas están involucradas en la formación de agregados >2 mm.

### **2.6.1. Exudados radicales**

La raíz produce un tipo de material orgánico, parecido al mucílago del nopal, pero con una composición bioquímica más compleja, se llaman exudados radicales y forman parte de la rizósfera, de forma más precisa, es la capa del suelo alrededor de las raíces que recibe el nombre de *ectorizósfera*, mientras que la capa de la raíz colonizada o potencialmente colonizable por los microorganismos puede llamársele endorizósfera. Las dos áreas son separadas por la capa superficial de la raíz, llamada *rhizoplano*.

Rovira (et al. 1970) hizo mención, que una raíz en el suelo libera materia orgánica, que varía de simples moléculas orgánicas a células y tejidos que son mudados en su proceso de desarrollo. Los principales compuestos liberados de las raíces son los siguientes: exudados, secreciones, mucílago, mucigel y lysates (Rovira *et al.*, 1970).

### **Exudados**

Son compuestos de bajo peso molecular, siendo depositados en el suelo en el empalme de las células o directamente a través de las paredes celulares epidérmicas en el suelo, no dependen del metabolismo. Se han encontrado un amplio rango de sustancias como los carbohidratos solubles, ácidos orgánicos, aminoácidos y reguladores del crecimiento. El papel de los exudados es significativo en la vuelta o

retorno de la materia orgánica en la rizósfera, en la formación de agregados del suelo y en la absorción de nutrimentos y agua.

### **Secreciones**

Son compuestos de bajo y de alto peso molecular, mucílagos liberados como resultado de los procesos metabólicos. Los mucílagos son un sustrato de disponibilidad rápida para los microorganismos y son pobremente definidos como materiales (a).- que se originan de la cofia de la raíz y son secretados por los cuerpos de Golgi

### **Mucílagos**

De acuerdo a Morel *et al.*, (1986), los mucílagos de las raíces exhiben una doble estructura, granular y en forma de fibrillas. Están compuestos principalmente de polisacáridos de alto peso molecular,  $> 15 \times 10^6$  Da, conteniendo fructosa, galactosa, glucosa, arabinosa, xilosa, unidades de manosa y una gran proporción de ácidos urónicos (ácido galacturónico). El mucigel es el material gelatinoso que se encuentra en la superficie de la raíz. Es el resultado del complejo raíz- suelo- microorganismos que incluyen mucílagos de la planta, células de bacterias y la materia orgánica del suelo coloidal y mineral.

### **Lisatos**

Son compuestos liberados por autólisis de las células epidérmicas más viejas. La cantidad y clase de exudados son afectadas por el tipo de sistema de raíz, la edad, la etapa de desarrollo de las plantas y por daños mecánicos. Otros factores que afectan la exudación de las raíces son: los factores ambientales como la temperatura y la luz vía retoños nuevos, pH, anaerobiosis, fuerzas mecánicas, resistencia a los microorganismos y nutrimentos. En general, las raíces liberan de 50 a 100 mg de materia orgánica por gramo de raíz por día (Foster *et al.* 1983).

## 2.7. La agregación y la estructura del suelo

El proceso de agregación del suelo es complejo y jerárquicamente estructurado, en el cual numerosos organismos y agentes cementantes juegan su papel (Durodoluwa, *et al.*, 1999; Rillig, 2004) así como también los factores abióticos, tales como los ciclos de sequía, humedad, congelamiento, etc. Todos estos procesos son capaces de orientar las partículas finas del suelo y atraerlas tan cerca unas a otras, que las fuerzas físicas entre ellas unen estas partículas muy firmemente.

Los agregados del suelo son importantes para mantener la porosidad del suelo y proveer estabilidad contra la erosión (Lupwayi *et al.*, 2001), y la estabilidad de los agregados tiene el potencial de servir como un indicador sensible de la degradación del suelo (Cerdá, 2000).

Se han clasificado los agentes cementantes en tres grupos: transitorios, temporales y persistentes. Los transitorios son materiales orgánicos, que se descomponen rápidamente por los microorganismos: el grupo más importante son los polisacáridos, el efecto de estos puede durar semanas. Los temporales son raíces e hifas, particularmente provenientes de hongos micorrízicos arbusculares, que persisten por meses o años y son afectados por el manejo. Los persistentes consisten en materiales húmicos degradados asociados con hierro amorfo, aluminio y aluminosilicatos.

De acuerdo con el modelo jerárquico de organización de los agregados, los macroagregados (>0.25 mm) están promovidos por raíces e hifas en la mayoría de los casos, mientras que en la formación de microagregados (<0.25 mm) intervienen compuestos húmicos. La estructura del suelo es importante para los ciclos biogeoquímicos y procesos de descomposición, formación y secuestro del carbono orgánico del suelo (COS), (Zang *et al.*, 2006); además, los agregados estables en agua juegan un papel indispensable en la resistencia contra la erosión e intensos aguaceros tropicales (Hernández *et al.*, 2006; Rillig y Steinberg, 2002).

La estructura del suelo puede verse como el espacio en donde se desarrolla la actividad de los microorganismos. Cambios en las propiedades físicas o químicas del

suelo frecuentemente afectan esta actividad biológica, la cual puede modificar la agregación del suelo y su estructura para hacer más favorable el medio para su crecimiento (Rillig y Steinberg, 2002). Por consiguiente, los organismos del suelo juegan un papel importante en la formación y estabilización de su estructura (Davidson y Grieve, 2006).

Durante la transformación microbiana de los residuos orgánicos dentro de los microagregados estables, las partículas de materia orgánica fragmentada (PMO) gradualmente comienzan a incrustarse con la arcilla y el mucílago microbiano, resultando en la formación de microagregados estables, los que presentan una descomposición más lenta que los macroagregados y están mejor protegidos contra la descomposición microbiana (Pulleman *et al.*, 2005). Esta deposición y posible protección del material orgánico del suelo, dentro de los agregados estables, puede ser un mecanismo importante biológicamente regulado para la acumulación y el mantenimiento de la materia orgánica (Beare *et al.*, 1997).

Las propiedades biológicas del suelo son esenciales para su sustentabilidad y son indicadores importantes de la calidad (Green *et al.*, 2005). Así, la continua aplicación de residuos al suelo y presencia de una población microbiana activa, que produce estos agentes cementantes, son vitales para la creación y retención de una estructura adecuada.

## **2.8. Suelo Vertisoles**

En la taxonomía de suelos (Soil Survey Staff, 2006), los Vertisoles son descritos como suelos de textura arcillosa, profundos y con grietas amplias en algún momento durante el año (Dudal, 1965). A nivel mundial, se estima que los Vertisoles ocupan hasta 350 millones de hectáreas y se consideran suelos fértiles que requieren un manejo especial por su alto contenido de arcilla (Ahmad y Mermut, 1996).

En México, los Vertisoles ocupan 9.5 millones de ha, representan 4.8% del territorio nacional: 38% y 18% son de agricultura de temporal y de riego, respectivamente (Ortiz, 1997); éstos son unidades puras, es decir, con pocas

asociaciones con otros tipos de suelos. Estos suelos se concentran en El Bajío (principalmente en Guanajuato) y en las planicies costeras del Golfo de México (Tamaulipas, Veracruz y Tabasco).

En el Bajío, la intensidad de laboreo del suelo bajo labranza convencional ha ocasionado una reducción en el contenido de materia orgánica en la mayoría de los suelos, con valores menores a 2%. Los efectos en el suelo, derivados del bajo contenido de materia orgánica se relacionan con problemas de compactación, los cuales se asocian a su vez con más energía para el laboreo y menor estabilidad estructural, ocasionando pérdidas de suelo por erosión y menor fertilidad por la pérdida de la capa superficial, que es la más rica en materia orgánica; así mismo, se producen problemas por encostramiento del suelo, debidos a que las partículas finas de la capa superficial son removidas por el agua de riego, lo que provoca su reacomodo y finalmente, la formación de costras. Otro problema es el piso de arado que trae como consecuencia la falta de drenaje y escaso crecimiento de raíces; además, cuando se le da mucho laboreo al suelo, los costos de producción se incrementan en detrimento de las ganancias de los productores.

## **2.9. Suelos arenosos**

Los suelos arenosos según la FAO (2001) tienen: Una textura areno-limosa o más gruesa, hasta una profundidad de por lo menos 100 cm a partir de la superficie del suelo, menos de 35% (en volumen) de fragmentos de roca u otros fragmentos gruesos dentro de los primeros 100 cm de profundidad. La mayoría de los Arenosoles en zona seca son utilizados para poco más que el pastoreo extensivo pero podrían ser utilizados para los cultivos herbáceos de regadío. Los Arenosoles en regiones templadas se utilizan para la producción de una mezcla de cultivos herbáceos y pastos; suplementariamente el riego por aspersión es necesario durante los períodos secos. Los Arenosoles en los trópicos húmedos son químicamente agotados y altamente sensibles a la erosión.

La arena es un material compuesto de partículas de entre 0,05 y 2 mm de diámetro, estos granos se obtienen por la descomposición o rompimiento de rocas. También representa la fracción de textura de un suelo hecha de tales partículas. La mayoría de las arenas son cuarzos con feldespatos en las más jóvenes y menos intemperizadas que las arenas.

Los suelos con textura arenosa presentan varios problemas para el agricultor. En general, tienen una capacidad de retención de agua pobre y el drenaje rápido por consiguiente los hace secos. Ellos también son propensos a la erosión del viento, sobre todo cuando la cubierta vegetal en una cubierta es escasa o inexistente. Su fertilidad inherente es generalmente baja, y los fertilizantes aplicados, fácilmente son lixiviados.

## 2.10. BIBLIOGRAFÍA GENERAL

- Ahmad, N., y Mermut, A. R., 1996.** Vertisols and technologies for their management. Developments in soil science 24. Elsevier, Amsterdam, the Netherlands. 550 pp.
- Álvarez, B. 2007.** Análisis de Factibilidad del cultivo de la Tuna en la Localidad de Icaño, Departamento La Paz. Dirección Provincial de Programación del Desarrollo. Ministerio de Producción y Desarrollo. Gobierno de la Provincia de Catamarca. Argentina.
- Angers, D.A., Caron, J., 1998.** Plant-induced changes in soil structure: processes and feedbacks. Biogeochemistry 45, 55-72.
- Baldock, J.A., Kay, B.D., 1987.** Influence of cropping history and chemical treatments on the water-stable aggregation of a silt loam soil. Can. J. Soil Sci. 67, 501-511.
- Barrientos, P. F., 1983.** Nopal y agaves como recurso de zonas áridas y semiáridas de México (en recursos agrícolas de zonas áridas y semiáridas de México), Centro de genética del C.P. Chapingo, México.
- Bearden, B.N., Petersen, L., 2000.** Influence of arbuscular mycorrhizal fungi on soil structure and aggregate stability of a vertisol. Plant Soil 218, 173-183.
- Beare, M. H.; Hu, S. Coleman, D. C. y Hendrix, P. F. 1997.** Influences of mycelial fungi on soil aggregation and organic matter storage in conventional and no-tillage soils. Applied Soil Ecology, vol. 5, p. 211-219.
- Ben-Hur, M., 1994.** Runoff, erosion, and polymer application in moving-sprinkler irrigation. Soil Sci. 158:283-290.
- Blanco, M. G. 1966.** El nopal como forraje para el ganado en las zonas áridas y aprovechamiento de la tuna. El Campo, México.
- Boix-Fayos, C., Calvo-Cases, A., Imeson, A. C. y Soriano-Soto, M. D. 2001.** Influence of soil properties on the aggregation of some Mediterranean soils and the use of aggregate size and stability as land degradation indicators. Catena, vol. 44, p. 47-67.
- Cárdenas, A., Arguelles, W.M, Goycoolea, F.M., (1998).** J. Prof. Assoc. Cactus Dev. 3:64.
- Cárdenas, A., Balderrama, J.R., Hernández, G. and Goycoolea, F.M., 1999.** Biopolímeros de alto valor de plantas nativas del desierto: riqueza sustentable desaprovechada. Memorias del Simposio Internacional sobre la Utilización y Aprovechamiento de la Flora Silvestre de Zonas Áridas. La Serena, Chile. p. 254-259.
- Cárdenas, A., Higuera Ciapara, I., and Goycoolea, F.M., 1997.** Rheology and aggregation of Cactus (*Opuntia ficus-indica*) Mucilage in Solution. J. PACD: 152-159.
- Cardenas, A., I., Higuera-Ciapara, and F.M., Goycoolea. 1998.** Rheology and aggregation of cactus (*Opuntia ficus-indica*) mucilage in solution. J. Prof. Assoc. Cactus Devel. (in press).
- Caron, J., Espinolda, C.R., Angers, D.A., 1996.** Soil structural stability during rapid wetting: influence of land use on some aggregate properties. Soil Sci. Soc. Am. J. 60, 901-908.

- Cerdá, A. 2000.** Aggregate stability against water forces under different climates on agriculture land and scrubland in southern Bolivia. *Soil & Tillage Research*, vol. 57, p. 159-166.
- Chesire, M.V., 1979.** *Nature and Origin of Carbohydrates in Soils.* Academic Press, New York.
- Chester, G., Attoe, O. J. and Allen, O. N. 1957.** Soil aggregation in relation to various soil constituents. *Soil Science Society of America Proceeding* 21, 272-277.
- Clapp, C. E. and Emerson, W. W. 1965.** The effect of periodate oxidation on the strength of soil crumbs. I. Qualitative studies. *Soil Science Society of America Proceeding* 29, 127-371.
- Corrales, J., Peña-Valdivia, C.B., Razo, M. and Sánchez, H.M., 2004.** Acidity modification associated to hour of the day of cut and elapsed time since harvest, and pH-buffer capacity in nopalitos (*Opuntia* spp.). *Postharvest Biology and Technology* 32(2):169-174.
- Davidson, D. A. y Grieve, I. C. 2006.** Relationships between biodiversity and soil structure and function: Evidence from laboratory and field experiments. *Applied Soil Ecology*, vol. 33, p. 176-185.
- Degens, B.P., 1997.** Macro-aggregation of soils by biological bonding and binding mechanisms and the factors affecting these: a review. *Aust. J. Soil Res.* 35,431-459.
- Dorioz, J.M., Robert, M., Chenu, C., 1993.** The role of roots, fungi and bacteria on clay particle organization. An experimental approach. *Geoderma* 56, 179-194.
- Dudal, R. 1965.** Dark clay soils of tropical and subtropical regions. Development Paper No. 83. FAO, Rome, Italy. 161 pp.
- Durodoluwa, J., Per Schjønning, O., Sibbesen, E. y Debosz, K.,1999.** Aggregation and organic matter fractions of three Nigerian soils as affected by soil disturbance and incorporation of plant material. *Soil & Tillage Research*, vol. 50, No. 9, p. 105-114.
- Duru, B., y Turker, N., 2005.** Changes in physical properties and chemical composition of cactus pear (*Opuntia ficus-indica*) during maturation. *J. PACD:* 22- 33.
- FAO, 2001.** Lecture notes on the major soils of the world. *World Soil Resources Reports*, 94. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations. 334 pp.
- Flores, C., J., de Luna y P. Ramírez. 1995.** El mercado mundial de la tuna. Informe final. Programa Nopal del CIESTAAM de la Universidad de Chapingo, México. Autónoma Chapingo.
- Foster, R. C., A. D. Rovira and T. W. Cockk. 1983.** Ultrastructure of the Root-Soil Interface, American Phytopathological Society, St. Paul, MN.
- Geohegan, M. J. and Brian, R. C. 1946.** Influence of bacterial polysaccharides on aggregate formation in soils. *Nature*, London 158, 837.
- Goldstein, G. y Nobel, P.S. 1991.** Changes in osmotic pressure and mucilage during low-temperature acclimation of *Opuntia ficus-indica*. *Plant Physiology*, 97: 954-961.
- Goycoolea F. M., Heras A., Aranaz I., Galed G., Fernández-Valle M. E., and Argüelles-Monal W. (2003).** Effect of Chemical Crosslinking on the Swelling and Shrinking Properties of Thermal and pH-Responsive Chitosan Hydrogels. *Macromolecular Bioscience*, 3, 612-619

- Granados, D., y A.D. Castañeda. 1996.** El Nopal. 2a Reimpresion, Ed. Trillas, Mexico.
- Green, V. S., Cavigelli, M. A., Dao, T. H. y Flanagan, D. C. 2005.** Soil physical properties and aggregate associated C, N and P distributions in organic and conventional cropping systems. *Soil Sci.* Vol. 170, p. 822-831.
- Greenland, D. J., Lindstrom, G. R. and Quirk, J. P. 1962.** Organic materials which stabilize natural soil aggregates. *Soil Science Society of America Proceeding* 26, 366-130.
- Haworth, W. N., Pinkard, R. W. and Stacey, M. 1946.** Function of bacterial polysaccharide in soil. *Nature*, London 1958, 836-837.
- Hernández, A., Ascanio, O., Morales, M.; Bojórquez, I., Norma, E. y García, J., 2006.** El suelo: Fundamentos sobre su formación, los cambios globales y su manejo. Nayarit: Universidad Autónoma, 255 p. ISBN 968833072-8.
- Huerta G., A. y Montes de la R., M.I., 2003.** Contenido de mucílago de 10 variantes de nopalito (*Opuntia* spp.) y su efecto en las propiedades físicas y texturales. Universidad Autónoma Chapingo. México. 82p.
- Jastrow, J.D., Miller, R.M., Lussenhop, J., 1998.** Contributions of interacting biological mechanisms to soil aggregate stabilization in restored prairie. *Soil Biol. Biochem.* 30, 905916.
- Ladd, J.N., R.C. Foster, P. Nannipieri, and J.M. Oades. 1996.** Soil structure and biological activity. p. 23-78. *In* G. Stotzky and J.-M. Bollag (ed.) *Soil biochemistry*. Volume 9. Marcel Dekker, New York, NY.
- Lupwayi, N. Z., Arshad, M. A., Rice, W. A y Clayton, G. W. 2001.** Bacterial diversity in water-stable aggregates of soils conventional and zero tillage management. *Applied Soil Ecology*, vol. 16, p. 251-261.
- Martin, J. P. 1945.** Microorganisms and soil aggregation: I. Origin and nature of some of the aggregating substances. *Soil Science* 59, 163-174.
- Martin, J. P. and Waksman, S. A. 1940.** Influence of microorganisms on soil aggregation and erosion. *Soil Science* 50, 29-47.
- Masschelein-Kleiner, L. 1995.** Ancient Binding Media, Varnishes and Adhesives. Roma, Italia, ICCROM.
- Matsuhira, B., Lillo, L.E., Sáenz, C., Urzúa, C.C., and Zárate, O., 2006.** Chemical characterization of the mucilage from fruits of *Opuntia ficus-indica*. *Carbohydrate Polymers* 63: 263– 267.
- Mauseth, J. D. 1984.** Introduction to Cactus anatomy (Part 7). *Cactus and Succulent Journal (US)*. 56: 33-37 pp.
- McGarvie, D., and Parolis, H., 1979.** The mucilage of *Opuntia ficus-indica*. *Carbohydrate Research* 61: 171- 179.
- McGarvie, D., and Parolis, H., 1981.** The acid labile peripheral chains of the mucilage of *Opuntia ficus-indica*. Elsevier Scientific Publishing Company 57- 65.
- Medina Torres, L., Brito de la Fuente, E., Torrestiana Sánchez, B. and Katthain, R., 2000.** Rheological properties of the mucilage gum (*Opuntia ficus-indica*). *Food Hydrocolloids* 14: 417- 424.
- Mehta, N. C., Streuli, H., Muller. M. and Deuel, H. 1960.** Role of polisaccharides in soil aggregation. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 11, 40-47.

- Merbach, W, Mirus, E., Knof, G., Remus, R., Ruppel, S., Russow, R, Gransee, A., Schulze, J., 1999.** Release of carbon and nitrogen compounds by plant roots and their possible ecological importance. *J. Plant Nutr. Soil. Sci.* 162, 373-383.
- Miller, R.M., Jastrow, J.D., 1990.** Hierarchy of root and mycorrhizal fungal interactions with soil aggregation. *Soil. Biol. Biochem.* 22, 579-584.
- Morel, J. L., M. Mench y A. Guecket. 1986.** Measurement of Pb and Cd binding with mucilage exudates from maize (*Zea mays* L.) roots, *Biol. Fertil. Soils*, 2, 29.
- Morel, J.L., Habib, L., Plantureux, S., 1991.** Influence of maize root mucilage on soil aggregate stability. *Plant Soil* 136, 1111-119.
- Nobel, P., Cavalier, J. 1992.** Mucilage in cacti: its apoplastic capacitance, associated solutes, and influence on tissue water relations. *Journal Experimental Botany* 43 (250): 641-648.
- Nobel, P.S., y T. L. 1986a.** Leaf and stem CO<sub>2</sub> uptake in the three subfamilies of the Cactaceae. *Plant Physiology* 80: 913-917.
- Ortiz S., C. A. 1997.** Estudio de suelos a nivel nacional. Carta Edafológica escala 1:1' 000, 000. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Estado de México, México. 82 p.
- Pulleman, M. M., Six, J.; Uyl, A., Marinissen, J. C. Y. y Jongmans, A. G. 2005.** Earthworms and management affect organic matter incorporation and microaggregate formation in agricultural soils. *Applied Soil Ecology*, vol. 29, p. 1-15.
- Razo M., Y. y Sánchez, H.M. 2002.** Acidez de 10 variantes de nopalito (*Opuntia* spp.) y su efecto en las propiedades químicas y sensoriales. Universidad Autónoma Chapingo. México. 104p.
- Reid, J.B., Goss, M.J., 1982.** Interactions between soil drying due to plant water use and decrease in aggregate stability caused by maize roots. *J. Soil Sci.* 33, 47-53.
- Rennie, D. A., Truog, E. y Ellen, O. N. 1954.** Soil aggregation as influenced by microbial gums, level of fertility and kind of crop. *Soil Science of America Proceeding* 18, 399-403.
- Retamal, N., J.M., Duran, y J., Fernandez. 1987.** Seasonal variations of chemical composition in prickly pear [*Opuntia ficus-indica* (L.) Miller]. *J. Sci. Food Agric.* 38:303-311.
- Reyes-Agüero, J., R. Aguirre-Rivera y H. Hernández. 2005.** Notas sistemáticas y una descripción detallada de *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. (Cactaceae). *Agrociencia* 39: 395-408.
- Rillig, M. C. 2004.** Arbuscular mycorrhizae, glomalin, and soil aggregation. *Canadian Journal of Soil Science*, vol. 84, p. 355-363.
- Rillig, M. C. y Steinberg, P. D. 2002.** Glomalin production by an arbuscular mycorrhizal fungus: a mechanism of habitat modification. *Soil Biology & Biochemistry*, vol. 34, p. 1371-1374.
- Rillig, M.C., Wright, S.F, Eviner, V.T., 2002a.** The role of arbuscular mycorrhizal fungi and glomalin in soil aggregation: comparing effects of five plant species. *Plant Soil* 238, 325-333.
- Rovira, A. D., R. C., Foster y J. K. Martin. 1970.** Note on terminology: origin, nature and nomenclature of the organic materials in the rhizosphere, in *The Soil-Root Intreface*, harley, J. L. and Russell, R. S., Eds.

- Saag, L.M.K., G.R., Sanderson, P., Moyna, y G., Ramos. 1975.** *Cactaceae mucilage* composition. *J. Sci. Food Agric.* 26:993-1000.
- Sáenz, C. 2006.** Utilización agroindustrial del nopal. *Boletín de Servicios Agrícolas de la FAO.*
- Sáenz, C. 2002.** Cactus pear fruits and cladodes: a source of functional components for foods. *Acta Hort* 581:253-263.
- Sáenz, C. y Montoya, L.C., 1999.** Nopalitos: Nueva hortaliza para Chile. *El Campesino*, 130 (6): 4-7.
- Sáenz, C., H. Berger, J. C. García, L. Galletti, V.G. de Cortázar, I. Higuera, C. Mondragón, A. Rodríguez-Félix, E. Sepúlveda, M.T. Varnero., 2006.** Utilización agroindustrial de nopal. *Boletín de Servicios Agrícolas de la FAO* Nº 162. Roma.
- Sáenz, C., Sepulveda, E., y Matsuhira, B., 2004.** *Opuntia* spp. Mucilage's: a functional component with industrial perspectives. *Journal of Arid Environments* 57: 275-290.
- Sajeva, M. y J. D. Mauseth. 1991.** Leaf-like structure in the photosynthetic succulent stems of Cacti. *Annals of Bot.* 68: 405-411 pp.
- Saravia-Tasayco, P.L. 2004.** Programa fundamental para el desarrollo económico del Estado de México hacia el 2005 y de competitividad visión 2020. Cluster Nopal. Tecnológico de Monterrey, México.
- Sepulveda, E., Sáenz, C., Align, E., and Acetone, C., 2007.** Extraction and characterization of mucilage in *Opuntia* spp. *Journal of Arid Environments* 68: 534- 545.
- Six, J., Bossuyt H., De Gryze, S., Deneff, K. 2004.** A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota, (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil Tillage Res* 79:7-3.
- Snyman, H.A.A., 2006.** A greenhouse study on root dynamics of cactus pear *Opuntia ficus-indica* and *O. robusta*. *Journal of Arid Environments* 65: 529- 542.
- Soil Survey Staff 2006.** Keys to soil taxonomy. United States Department of Agriculture. 618 Natural Resources Conservation Service, Washington, DC.
- Stacey, M. and Barker, S. A. 1960.** Polysaccharides of microorganisms. Oxford.
- Sudzuki, F. 1999.** Anatomía y morfología. pp. 29-36. *In:* Barbera, G., Inglese, P. y Pimienta, E., eds. *Agroecológica, cultivo y usos del nopal. Estudio FAO Producción y Protección Vegetal*, 132. Roma.
- Ting Irwin, P., 1997.** Carbohydrate Metabolism in Cacti: Gums and Mucilage. *J. PACD*, 2: 7-12.
- Traore, O., Groleau-Renaud, V., Plantureux, S., Tubeileh, A., Boeuf- Tremblay, V., 2000.** Effect of root mucilage and modelled root exudates on soil structure. *Eur. J. Soil Sci.* 51, 575581.
- Varnero, M. T. 2001.** Sistemas de reciclaje de residuos sólidos orgánicos: biodigestores. *Rev. Chile Agric.* XXVI (250): 132-135.
- Varnero, M. T. y García de Cortázar, V. 1998.** Energy and biofertilizer production: alternative uses for pruning-waste of cactus-pear (*Opuntia ficus indica*. L. Mill). Pp. 96-102. *In:* C. Sáenz, ed. *Proceedings. International Symposium "Cactus pear and nopalitos processing and uses"*. Santiago, Chile. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Universidad de Chile, FAO (International Technical Cooperation Network on Cactus pear. CACTUSNET-FAO). Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Roma.

- Wallace, A., 1986.** A polysaccharide (guar) as a soil conditioner. *Soil Sci.* 141:371-373.
- Young, I.M., 1998.** Biophysical interactions at the root-soil interface: a review. *J. Agric. Sci.* 130, 1-7.
- Zang, A., Noellemeier, E. y Tiessen, H. 2006.** Carbon turnover and C13 natural abundance under land use change in the semiarid La Pampa, Argentina. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, vol. 70, p. 1541-1546.

### **III. OBJETIVOS**

#### **3.1. Objetivo general**

El objetivo general del presente estudio fue evaluar si había diferencias en las propiedades físicas y químicas en un suelo arenoso y un suelo arcilloso por la aplicación de cantidades crecientes de mucílago de nopal. Así como investigar el desarrollo estructural de ambos suelos (textura arcillosa y arenosa) a nivel micromorfológico como consecuencia de la aplicación de tres dosis de mucílago. Además, evaluar las respuestas de los componentes de rendimiento y la cantidad de agua consumida por el cultivo de trigo debido a la aplicación de diferentes dosis de mucílago de nopal, tanto a un suelo arcilloso como a un arenoso.

#### **3.1.1. Objetivos específicos**

Evaluar la variación de los componentes de rendimiento del cultivo de trigo con la aplicación de diferentes dosis de mucílago de nopal en dos suelos, uno con textura arcillosa y el otro con textura arenosa: cantidad de agua consumida por el cultivo, materia seca, altura de planta, número de hojas, número de semillas y peso de grano.

Evaluar el desarrollo estructural debido al efecto de la aplicación de diferentes dosis de mucílago por medio de los siguientes componentes: básicos, minerales, masa basal, color de la masa, huecos, agregación y tipo de microestructura, para suelos con textura arcillosa y arenosa utilizando láminas delgadas.

Evaluar los cambios de las propiedades físicas y químicas: estabilidad estructural, contenido de carbono, contenido de nitrógeno y relación C/N, como consecuencia de diferentes dosis de mucílago de nopal aplicadas a suelos con textura arcillosa y arenosa.

#### **IV. HIPÓTESIS**

La aplicación de mucílago de nopal incrementa la retención de agua y mejora las propiedades físicas del suelo y la cantidad de agua consumida por el cultivo, materia seca, altura de planta, número de hojas, número de semillas y peso de grano son afectados por las diferentes dosis de mucílago de nopal, así como por la textura del suelo.

Las diferentes dosis de mucílago de nopal, así como la textura de los suelos a los que se les aplicó (arcillosa y arenosa) hacen que el desarrollo estructural de ambos suelos difiera entre ellos.

La estabilidad estructural, contenido de carbono, contenido de nitrógeno y relación C/N son afectados por las diferentes dosis de mucílago.

## V. DOSIS DE MUCÍLAGO DE NOPAL (*Opuntia spp.*) EN LOS COMPONENTES DE RENDIMIENTO DE TRIGO (*Triticum aestivum* L.).

### 5.1. RESUMEN

El género *Opuntia* pertenece a la familia Cactaceae, debido a su uso eficiente del agua. Los cladodios se caracterizan por la producción de mucílago, que es un polisacárido complejo formado por azúcares como: ramnosa, arabinosa, galactosa y xilosa. Por esto se utilizó para evaluar sus efectos en los componentes de rendimiento del cultivo de trigo, se utilizaron dos tipos de suelos, uno con textura arcillosa y otro con textura arenosa. Los tratamientos comparados, tanto para el suelo con textura arcillosa y arenosa fueron: T1=0-0 (Testigo) sin mucílago, solamente con agua, T2=10-90, T3=20-80, T4=30-70, T5= 40-60, T6=50-50, T7=60-40, T8=70-30 y T9=80-20. Donde, T= Tratamiento, la primera cantidad corresponde al mucílago (%), la segunda a la cantidad de agua (%), correspondientes a las soluciones aplicadas a cada uno de los suelos. Se estableció un diseño completamente al azar con nueve repeticiones. Las variables medidas fueron: cantidad de agua consumida por el cultivo de trigo a lo largo de su ciclo, y los componentes de rendimiento, altura de planta, número de hojas, peso de grano, número de semillas o granos y materia seca. Para el suelo con textura arcillosa los resultados con diferencias significativas fueron para los tratamientos: con 40% de mucílago y 60% de agua , el tratamiento con 60% de mucílago y 40% de agua y el tratamiento con 80% de mucílago y 20% de agua . Para el suelo arenoso, los tratamientos con 70% de mucílago y 30% de agua y con 80% de mucílago y 20% de agua fueron los que presentaron diferencias significativas.

**Palabras clave:** *mucílago, suelo arenoso, suelo arcilloso, materia seca, número de granos.*

## 5.2. ABSTRACT

The genus belongs to the family Opuntia Cactaceae, due to its efficient use of water. Cladodes are characterized by the production of mucilage which is a polysaccharide complex consisting of sugars such as rhamnose, arabinose, galactose and xylose. For this was used to assess their effects on crop yield components of wheat, we used two types of soils, one with and one with clayey sandy texture. The treatments compared to both the clay soil and sandy texture were: T1 = 0-0 (Control) without mucilage, water alone, T2 = 10-90, T3 = 20-80, 30-70 = T4, T5 = 40-60, T6 = 50-50 = 60-40 T7, T8 and T9 = 70-30 = 80-20. Where, T = treatment, the first number corresponds to the mucilage (%), the second water quantity (%), corresponding to the solutions applied to each of the floors. They established a completely randomized design with nine replications. The variables measured were: amount of water consumed by the crop of wheat throughout the cycle, and components of yield, plant height, leaf number, grain weight, number of seeds or grains and dry matter. For clayey soil with the results with significant differences for the treatments were: 40% mucilage and 60% water, treatment with 60% mucilage and 40% water and treating with 80% and 20% mucilage of water. For sandy soil, treatments with 70% mucilage and 30% water and 80% mucilage and 20% water were the significant differences.

**Keywords:** *mucilage, sandy soil, clay soil, dry matter, number of grains.*

### 5.3. INTRODUCCIÓN

El trigo (*Triticum aestivum* y *T. durum* L.) es uno de los principales cultivos a nivel mundial, ya que se estimó una producción, en los años 2008 y 2009, de 683 millones de toneladas (Canimolt, 2008). La producción de trigo en México en el año 2008 fue de 3.3 millones de toneladas, de las cuales 1.9 millones fueron trigos cristalinos y 1.4 millones destinados para la panificación (INFORURAL, 2008).

Existen diversas definiciones de productividad, y el término suele confundirse con producción. La productividad se entiende como una cantidad producida por un vector de insumos (*ej.* fertilizantes, agua, energía, entre otros). Se ha observado un continuo aumento de la producción que comenzó con el aumento del potencial de rendimiento de los cultivos a través del mejoramiento genético e intensificación del manejo agronómico que permitió que se expresara su mayor potencial. A pesar del aumento en producción se observó una pérdida de productividad de cultivos y rotaciones (Vlek *et al.*, 1981).

Los estudios fisiológicos tradicionalmente analizan el rendimiento en términos de componentes numéricos. El rendimiento de grano es una función de sus dos componentes primarios: número de granos por m<sup>2</sup> y peso de grano. El primero a su vez tiene subcomponentes como plantas por m<sup>2</sup>, espiga por planta, espiguillas por espiga y granos por espiguilla. A primera vista parecerá fácil explicar los factores que influyen en el rendimiento en términos de sus componentes. Sin embargo, la casi invariable relación negativa que existe entre ellos, hace esta explicación casi inefectiva. Esto significa que el incremento en un componente, no siempre resulta en el incremento en rendimiento de grano, sino que ocasiona una variación compensatoria en otros componentes. Esto ha provocado que en la mayoría de los programas de mejoramiento el rendimiento continúe siendo el factor más importante en la selección de progenies. Sin embargo, el entendimiento de las bases de estas relaciones entre los componentes del rendimiento, permitirán su manipulación con propósito de incrementarlo (Slafer *et al.*, 1996).

El proceso de selección de genotipos en generaciones segregantes y avanzadas en programas de mejoramiento genético de trigo se realiza básicamente considerando el rendimiento, resistencia a enfermedades y valor agronómico. Dentro de éste último se incluyen características como la floración, madurez, altura de planta, etc. No se puede negar que la selección bajo estos criterios ha tenido éxito. Sin embargo, los cambios operados por el mejoramiento genético sobre algunos aspectos morfológicos, de desarrollo y fisiológicos, han sido indirectos y aleatorios.

En relación a caracteres morfológicos, se tiene un buen número de estudios sobre el conocimiento alrededor de la dureza del grano, número de hojas, tamaño de las hojas, tamaño de la espiga, etc. y su relación con el rendimiento. Se tienen además otros aspectos como la determinación de si existe diferencia genética en la fuerza del pulvínulo para levantar los tallos cuando se han acamado, pues esto permitiría recuperar una porción del rendimiento que se pierde por este factor. Otro aspecto importante sería, si reduciendo el espacio hueco en los tallos se incrementa la resistencia al acame y la eficiencia en el transporte de sustancias y consecuentemente el rendimiento de grano.

En aspectos de desarrollo, se tiene claro que el mejoramiento del rendimiento de grano se ha operado vía un incremento en el número de granos por  $m^2$ , en el mejoramiento futuro esta estrategia parece todavía viable; no obstante la relación negativa que existe con el peso de grano. En el futuro será necesario un incremento simultáneo del número de granos y de la disponibilidad de asimilados; el primero para incrementar la fuerza de la demanda y la segunda para evitar restricción por competitividad. Esto podría llevarse a cabo con la manipulación de la temperatura y el fotoperiodo en etapas fenológicas específicas como la elongación del tallo y el período de llenado de grano. Hay algunos indicios de que existe germoplasma de grano grande y con un alto número de granos por  $m^2$  que podría utilizarse el mejoramiento simultáneo de los dos componentes primarios del rendimiento.

Como lo han mostrado algunos estudios, el incremento del rendimiento se ha debido al índice de cosecha, más que al incremento de biomasa total. Esto parece viable de seguirse explotando; sin embargo, como es sabido el índice de cosecha tiene un límite. Se ha sugerido la manipulación de la fuerza de la demanda a través de características más eficientes para la producción de biomasa antes de la antesis. Esto sería posible utilizando estrategias como una mayor eficiencia en el uso de la radiación, de la eficiencia respiratoria e incrementando la tasa de asimilación de CO<sup>2</sup>.

El mejoramiento genético de trigo ha tenido resultados importantes en el incremento del potencial de rendimiento de grano. El uso de parámetros morfológicos, de desarrollo y fisiológicos permitiría, acelerar el proceso de mejoramiento genético y haría este proceso menos empírico, al tenerse conocimiento de las bases científicas de las relaciones del rendimiento y sus diferentes componentes.

#### **5.4. MATERIALES Y MÉTODOS**

Para llevar a cabo los trabajos experimentales, se optó por realizarlos en dos tipos de suelo, que de acuerdo a su textura, se clasificaron en suelo arcilloso y suelo arenoso. La descripción de los sitios de recolección, se mencionan a continuación:

##### **5.4.1. Descripción de la zona de recolección del suelo arcilloso**

El suelo se recolectó en el Campo Experimental Bajío (CEBAJ), perteneciente al Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). El CEBAJ se localiza en Celaya, Guanajuato, entre los paralelos 20° 30' 57" y 20° 36' 34" Norte y los meridianos 100° 49' 20" y 101° 06' 40" Oeste. Los usos de suelos dominantes en la zona son la agricultura de riego, la agricultura de temporal y la ganadería extensiva (INEGI, 1988b).

##### **5.4.2. Descripción de la zona de recolección del suelo arenoso**

El área de recolección del suelo arenoso se localiza en el Colegio de Postgraduados, dentro de las coordenadas geográficas: 19° 22' y 19° 37' de latitud Norte y entre los 98° 54' y 99° 03' de longitud Oeste, con una altitud de 2240 m.s.n.m.

#### **5.4.3. Homogeneización de las muestras de suelo arcilloso y arenoso**

Para realizar la homogeneización de las muestras de suelo; primeramente se procedió a secarlas a temperatura ambiente, posteriormente se realizó su molienda de forma manual. Una vez realizado lo anterior, se procedió a su homogeneización, utilizando el tamiz del número 10, con apertura de malla de 2 mm.

#### **Localización geográfica**

El trabajo experimental se realizó en los invernaderos del Departamento de Parasitología de la Universidad Autónoma Chapingo que se ubican en el área de Texcoco, entre 19°22'00" y 98°35'27" LN y 98°56'44" LW (Macedonio, 1998), con una altitud cercana a los 2250 m.s.n.m. El clima del área es C(wo) (w) b (i'); templado subhúmedo, con una precipitación media anual de 650 mm y un régimen de lluvia en verano. La temperatura anual oscila entre 12 y 18° C, con oscilación térmica entre 5 y 7° C.

#### **Recolección de las pencas o cladodios de nopal**

Las pencas de nopal se consiguieron de la huerta de nopales ubicada cerca de la feria del caballo de Texcoco, propiedad del señor Adán Espinosa, originario del municipio de Atenco (Figura 1). Las pencas se seleccionaron con base a su edad, aproximadamente de tres meses.



**Figura 1. Plantación de nopal, ubicada en Texcoco.**

### 5.5. Extracción del mucílago de nopal

La extracción del mucílago se realizó con un extractor casero de jugo de zanahoria (Figura 2). Las pencas se trozaron en tiras de aproximadamente un centímetro de ancho y de largo dependiendo del tamaño de la penca, para facilitar la extracción del mucílago.



Figura 2. Extractor casero utilizado para la extracción del mucílago de nopal.

### 5.6. Unidades experimentales

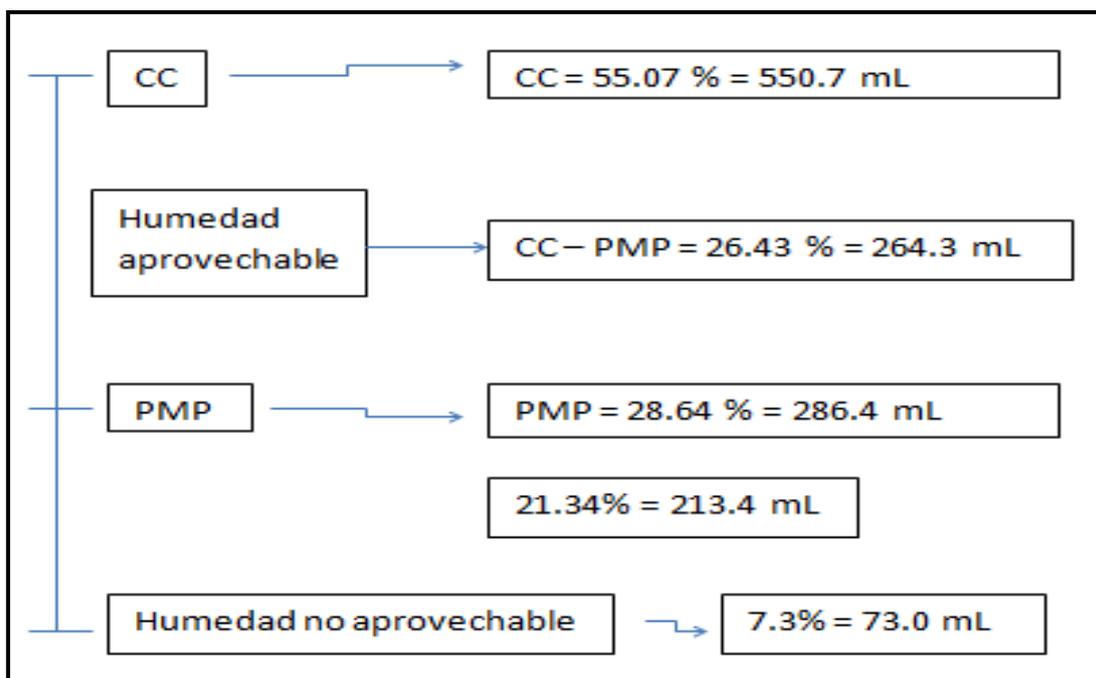
Las unidades experimentales constaron de vasos de unicel con capacidad para 300 mL, a los cuales se les agregaron 200 g de suelo por unidad experimental, lo anterior, fue para el experimento en suelo arcilloso como para el experimento en suelo arenoso.

### 5.7. Tratamientos

Se evaluaron nueve tratamientos, para cada tipo de suelo (Cuadro 1 y 2). Para su determinación, se consideró el perfil de humedad del suelo, por lo que fue necesario determinar las constantes de humedad; capacidad de campo (CC) y punto de marchitamiento permanente (PMP) en laboratorio. Una vez definidos estos parámetros, se procedió al cálculo del porcentaje de humedad aprovechable, como se puede observar en la Figura 7 y 8.

**Cuadro 1.** Tratamientos aplicados al suelo arcilloso, para la primera columna tenemos que: T= Tratamiento, la primera cantidad al porcentaje de mucílago, la segunda al porcentaje de agua.

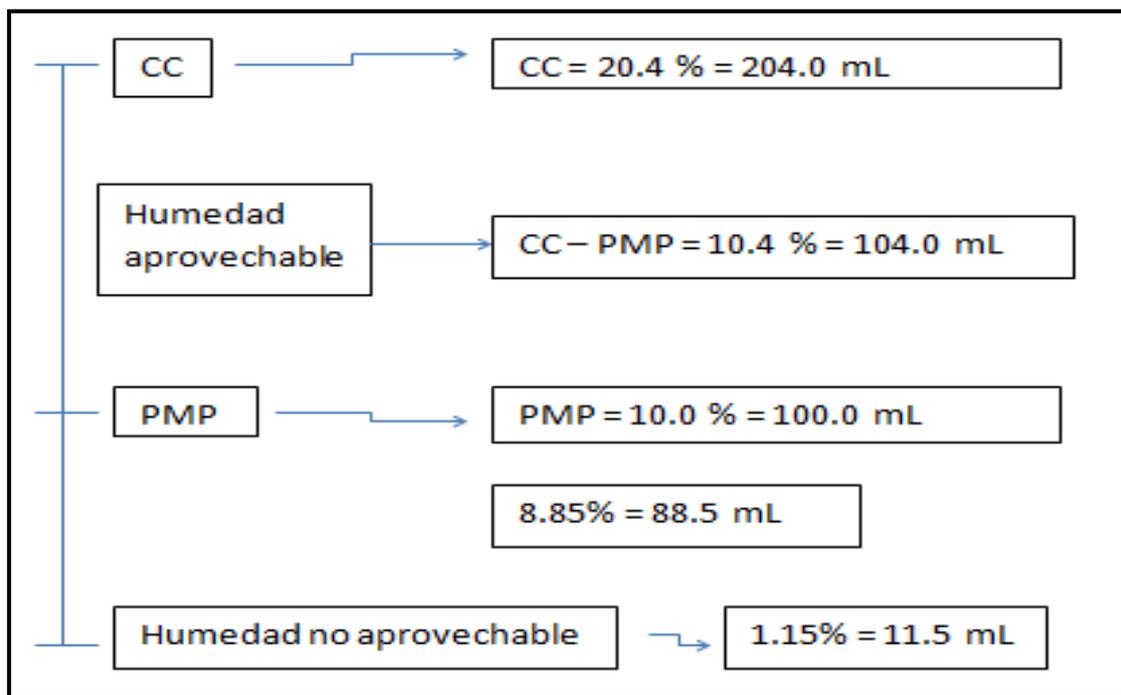
Tratamiento	Cantidad de mucílago (mL)	Cantidad de agua (mL)	Mucílago + agua (mL)	Diferencial de agua (mL)	Total de mL aplicados	Total de mucílago aplicado (mL)
T1=testigo	0.0	50.22	50.22	40.55	90.77	0
T2=10-90	5.2	45.20	50.22	40.55	90.77	45.18
T3=20-80	10.04	40.18	50.22	40.55	90.77	90.36
T4=30-70	15.07	35.15	50.22	40.55	90.77	135.63
T5=40-60	20.09	30.13	50.22	40.55	90.77	180.81
T6=50-50	25.11	25.11	50.22	40.55	90.77	225.99
T7=60-40	30.13	20.09	50.22	40.55	90.77	271.17
T8=70-30	35.15	15.07	50.22	40.55	90.77	210.90
T9=80-20	40.18	10.04	50.22	40.55	90.77	361.62



**Figura 3.** Perfil de humedecimiento del suelo arcilloso con las constantes de humedad, capacidad de campo (CC) y punto de marchitamiento permanente con la humedad aprovechable y no aprovechable.

**Cuadro 2. Tratamientos aplicados al suelo arenoso, para la primera columna tenemos que: T= Tratamiento; la primera cantidad al porcentaje de mucílago, la segunda al porcentaje de agua.**

Tratamiento	Cantidad de mucílago (mL)	Cantidad de agua (mL)	Mucílago + agua (mL)	Diferencial de agua (mL)	Total de mL aplicados	Total de mucílago aplicado (mL)
T1=testigo	0.0	38.76	38.76	16.81	55.57	0
T2=10-90	3.88	34.88	38.76	16.81	55.57	34.92
T3=20-80	7.75	31.01	38.76	16.81	55.57	69.75
T4=30-70	11.63	27.13	38.76	16.81	55.57	104.67
T5=40-60	15.50	23.26	38.76	16.81	55.57	139.50
T6=50-50	19.38	19.38	38.76	16.81	55.57	173.42
T7=60-40	23.26	15.50	38.76	16.81	55.57	209.34
T8=70-30	27.13	11.63	38.76	16.81	55.57	244.17
T9=80-20	31.01	7.75	38.76	16.81	55.57	279.09



**Figura 4. Perfil de humedecimiento del suelo arenoso con las constantes de humedad, capacidad de campo (CC) y punto de marchitamiento permanente con la humedad aprovechable y no aprovechable.**

### **5.8. Material genético.**

La semilla de trigo fue proporcionada por el Dr. Ignacio Benítez Riquelme del programa de mejoramiento de trigo del postgrado de Genética del Colegio de Postgraduados. Las características de este material se mencionan a continuación: línea experimental de trigo suave, variedad LTC-144, para áreas de temporal, floración en verano a los 65 días y su madurez a los 120 días, altura de la planta de 95 cm, producción de 6 ton. Aproximadamente bajo temporal benigno, de grano grande y de espiga grande entre 3-14 cm de longitud.

La siembra se realizó en los vasos de unicel, colocando 3 semillas por unidad experimental, después de haberse aplicado un riego y el mucílago de nopal. Los riegos y la toma de datos se realizaron cada dos días. Las temperaturas en el invernadero se registraron con dos termómetros de Temperaturas de máximas y mínimas; la temperatura mínima media osciló en 13.3°C, la media máxima en 36.5°C y la media normal en 22.2°C.

### **5.9. Componentes de rendimiento evaluados con diferentes dosis de mucílago en suelo arcilloso y arenoso**

Los componentes evaluados son: cantidad de agua (mL), altura de planta (cm), número de hojas, peso de grano (g), número de semillas, materia seca (g).

### **5.10. Análisis estadístico**

Para conocer el efecto del mucílago de nopal en los componentes de rendimiento del cultivo de trigo en cada una de las unidades experimentales con suelo arcilloso y arenoso, se realizó el análisis de varianza (ANOVA). Además, de la prueba de comparación de medias, de Diferencias Mínimas Significativas (DMS) (Martínez, 1988). Los análisis estadísticos se procesaron con el Sistema de Análisis Estadístico (SAS) de acuerdo a Rebolledo (2002).

## **5.11. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### **5.11.1. Registro de temperaturas**

Se utilizó un termómetro de máxima y mínima, además de registrar la temperatura normal diaria. Los resultados se muestran en la Figura 5. La temperatura tiene un papel importante en las distintas etapas ontogénicas del cultivo de trigo y están reguladas por tres factores determinantes: a) temperatura, b) el fotoperiodo (o duración del día) y c) la vernalización (requerimientos de horas de frío). El conocimiento de las respuestas del cultivo a estas variables ambientales es de suma importancia para poder caracterizar sus efectos y la adaptabilidad de los distintos cultivares de trigo a las distintas zonas productivas de nuestro país.

Temperaturas más cálidas aceleran la tasa de desarrollo del cultivo y promueven, por ejemplo, una floración más temprana comparada con la ocurrencia de temperaturas frescas para el mismo periodo. Una forma de eliminar el efecto de las variaciones en las temperaturas sobre la tasa de desarrollo del cultivo (y por lo tanto sobre la duración de las etapas ontogénicas) es a través del uso del tiempo térmico (o unidades térmicas). A diferencia de lo que ocurre con la temperatura, la respuesta al fotoperiodo y a la vernalización ocurre en periodos particulares dentro del ciclo del cultivo. Así, la respuesta a la vernalización ocurre en el periodo que media entre la inhibición de la semilla hasta que el ápice cambia de vegetativo a reproductivo (etapa vegetativa). Las temperaturas vernalizantes se dan en un rango de 0 a 12 °C siendo la óptima entre 5-7 °C. Estos cultivares no pueden ser sembrados en zonas con altas temperaturas medias durante las etapas tempranas del cultivo ya que se correrá un alto riesgo de que dilaten la floración con los consiguientes efectos negativos sobre el número (menor cociente fototermal) y el peso de los granos (mayor temperatura de llenado).

El trigo comienza a censar el fotoperiodo desde la emergencia de la primera hoja y responde a este factor ambiental hasta la floración. La respuesta al fotoperiodo es de tipo cuantitativa y puede definirse como una planta de día largo (Miralles y

Slafer, 1999). Es decir que a medida que se incrementa la duración del día, la duración de las etapas tiende a acortarse.

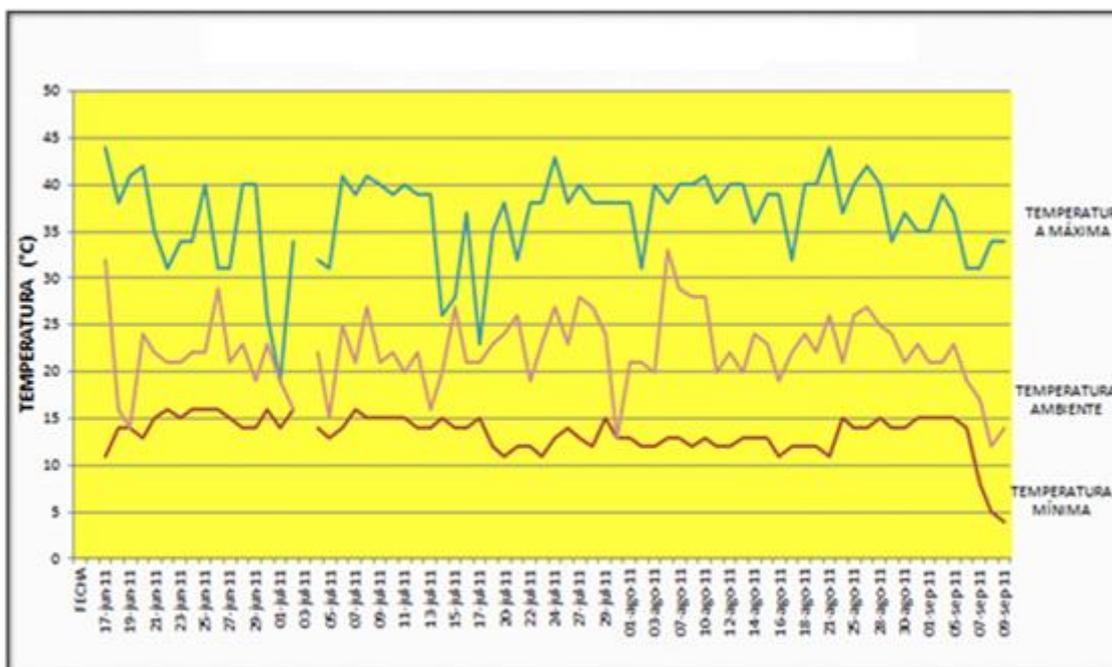


Figura 5. Valores de temperaturas máximas, mínimas y ambiental diaria en invernadero con cultivo de trigo establecido.

### 5.11.2. Cantidad de agua

Para la variable cantidad de agua consumida por el cultivo de trigo en suelo arcilloso (Figura 6), fue afectada significativamente ( $\alpha=0.05$ ). La comparación de medias entre tratamientos, mostró que los tratamientos con 40% de mucílago y 60% de agua, 50% de mucílago y 50% de agua, 60% de mucílago y 40% de agua, 70% de mucílago y 30% de agua y 80% de mucílago y 20% de agua con un valor promedio de 35.93 mL de agua, fueron estadísticamente diferentes al otro grupo de tratamientos formado por el testigo, el tratamiento con 10% de mucílago y 90% de agua, 20% de mucílago y 80% de agua y 30% de mucílago y 70% de agua con un promedio de 33.22 mL de agua consumida. La diferencia entre el tratamiento con 80% de mucílago y 20% de agua con el valor más alto, comparado con el tratamiento testigo con el valor más bajo, fue de 11.52%.

En cuanto al suelo arenoso (Figura 6), el análisis estadístico presentó diferencias estadísticas ( $\alpha=0.05$ ) en la cantidad de agua (mL) consumida por el cultivo de trigo. Los tratamientos con diferencias significativas fueron con 50% de mucílago y 50% de agua con el valor más bajo (33.0 mL) y el Testigo, con valor de 35.22 mL de agua, siendo superior el tratamiento con 50% de mucílago y 50% de agua al Testigo con 6.30%. Los tratamientos con 10% de mucílago y 90% de agua, 20% de mucílago y 80% de agua, 30% de mucílago y 70% de agua, 40% de mucílago y 60% de agua, 60% de mucílago y 40% de agua y 70% de mucílago y 30% de agua, estadísticamente no presentaron diferencia entre ellos.

Los mayores consumos de agua del cultivo de trigo, en el suelo arcilloso y arenoso, se encuentran en los tratamientos con mayor cantidad de mucílago, y éste como parte de la materia orgánica, está asociado a las partículas de limo y arcilla (Christensen, 1992; Mathus, 1994). Una hipótesis para explicar estos resultados la propuso Hassink *et al.* (1997) la cual, menciona que las fracciones de arcilla y limo en suelos arenosos se encuentran libres, mientras que en suelos arcillosos forman densos paquetes de agregados. Por lo tanto, la superficie específica disponible para retener residuos orgánicos incorporados es mayor en suelos arenosos que en suelos arcillosos. De éste modo la disponibilidad de agua en estos suelos arenosos es mayor que en los arcillosos, aunque se pierde fácilmente debido a su débil tensión que ejercen las partículas del suelo sobre las moléculas de agua. La diferencia radica en que los suelos arcillosos los procesos de pérdida de agua no son tan intensos como en los arenosos.

La textura es el indicador de la cantidad de agua que un suelo puede contener, por lo tanto, el exceso (agua gravitacional) se moverá fuera de la zona de raíces y se dirigirá hacia los mantos freáticos, arrastrando con ella sustancias disueltas hacia el agua subterráneas (Cornelis *et al.*, 2001).

Por otro lado, el agua es fundamental durante la formación de la semilla, también influye en su calidad. El estrés hídrico (Dornbos *et al.*, 1989; Ghassemi *et al.*, 1997) y las deficiencias de minerales y las temperaturas extremas (Franca *et al.*, 1993; Grass y Burris, 1995) son los más comunes y de mayor efecto en la calidad de la

semilla. Las deficiencias hídricas durante el llenado de grano pueden reducir la germinación de la semilla (Heatherly, 1993), causar 100% de arrugamiento de la testa de la semilla y disminuir significativamente el peso y vigor de semillas en soya (Franca *et al.*, 1993). Las deficiencias de humedad acompañadas de altas temperaturas provocan una alta proporción de semillas pequeñas con baja germinación y vigor en soya (Dornbos y Müllen, 1991); el estrés hídrico y temperaturas de 32°C disminuyen la germinación de la semilla de frijol (*Phaseolus vulgaris* y *P. acutifolius*) en 11% (Lin y Markhart, 1996).

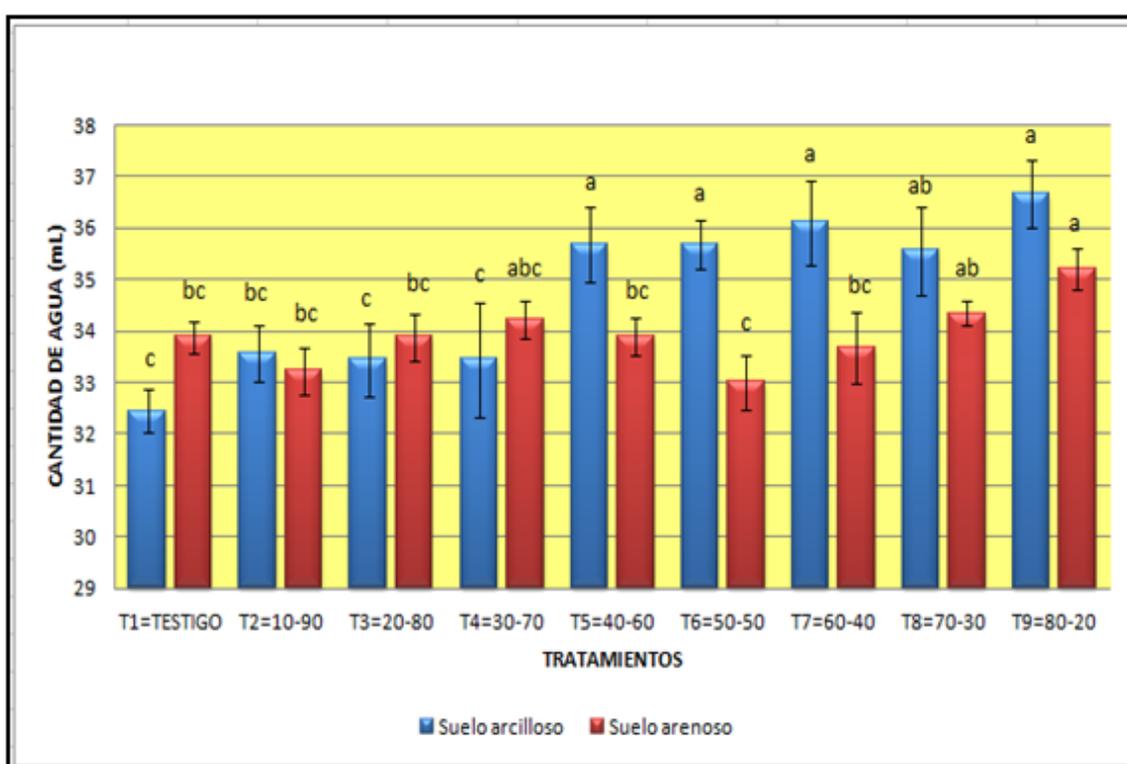


Figura 6. Cantidad de agua (mL) aplicada al cultivo de trigo en su ciclo vegetativo, en suelo con textura arcillosa y arenosa, bajo condiciones de invernadero.

\*Barras con la misma literal, para cada uno de los suelo, indican valores estadísticamente similares ( $\alpha=0.05$ ).

### 5.11.3. Altura de planta

La variable altura de planta (cm) para suelo arcilloso (Figura 7) presentó diferencias estadísticas en el análisis de varianza ( $\alpha=0.05$ ), en los tratamientos con 60% de mucílago y 40% de agua, con 20% de mucílago y 80% de agua y con 10% de mucílago y 90% de agua, cuyos valores fueron de 13.44, 9.44 y 8.55 cm,

respectivamente. El tratamiento con 60% de mucílago y 40% de agua estadísticamente fue diferente al tratamiento con 20% de mucílago y 80% de agua y con 10% de mucílago y 90% de agua, aunque éstos últimos fueron iguales estadísticamente.

Para el suelo arenoso (Figura 7) se observaron diferencias significativas ( $\alpha=0.05$ ) en los tratamientos con 70% de mucílago y 30% de agua, con 10% de mucílago y 90% de agua y con 50% de mucílago y 50% de agua. El tratamiento con 70% de mucílago y 30% de agua, estadísticamente fue diferente a los tratamientos con 10% de mucílago y 90% de agua y con 50% de mucílago y 50% de agua. A continuación, se presentan los valores para los tratamientos antes mencionados: 11.88 cm, 9.22 cm y 7.77 cm, respectivamente.

Los factores de altura de la planta no han sido estudiados recientemente en gran medida. La dificultad de utilizar altura de la planta como un factor para predecir mejor el potencial de rendimiento es que debe ser acoplado con algún otro parámetro que tome en cuenta la variabilidad espacial de las plantas. Por ejemplo, Mallarino *et al.* (1999) observaron que es posible que una variable no esté relacionada con el rendimiento en un campo debido a que el rango de variación dentro de ese campo está por encima o por debajo del rango en el que se influye en los rendimientos.

Sin embargo, Machado *et al.* (2002) encontraron que la altura de planta explicó 61% de la variación en el rendimiento de grano en el maíz. Estudios realizados en la Universidad Estatal de Iowa mostró que en tres de los cinco campos de maíz, una buena relación se encontró entre el rendimiento y la altura (Mallarino *et al.*, 1999). El trabajo de maíz en Oklahoma State University sugiere que la altura de la planta puede ser un indicador fiable de la biomasa y rendimiento de grano final sobre la base por planta.

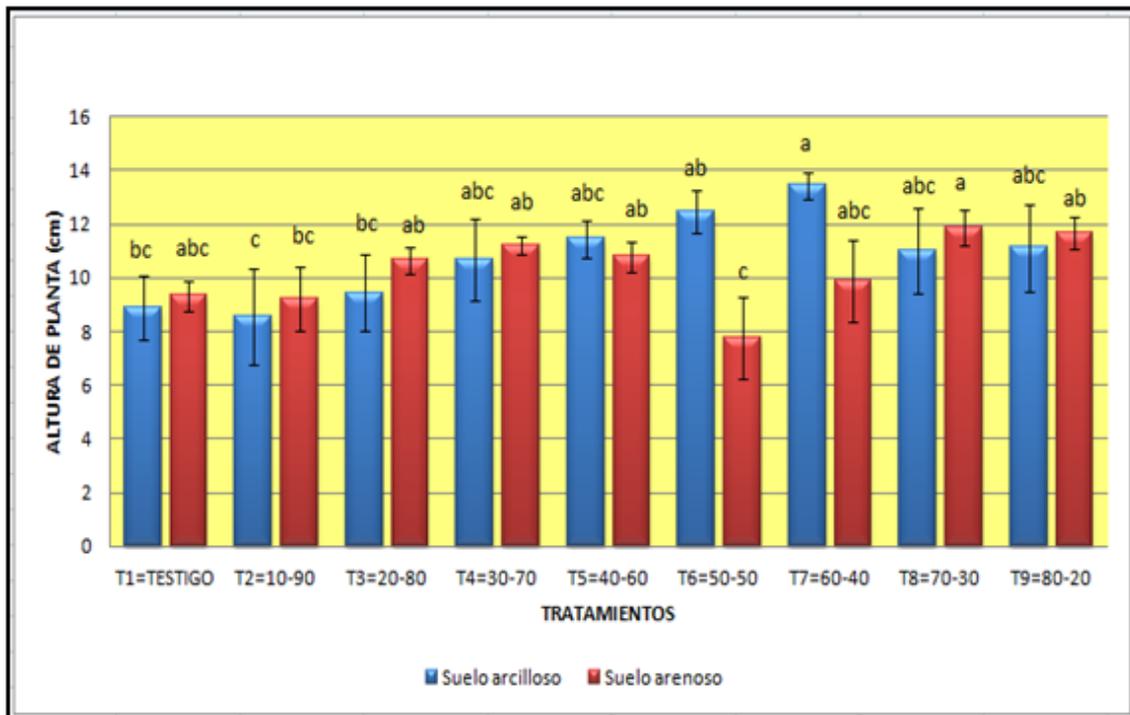


Figura 7. Altura de planta (cm) para el cultivo de trigo en suelo de textura arcillosa y arenosa bajo condiciones de invernadero.

\*Barras con la misma literal, para cada tipo de suelo, indican valores estadísticamente similares ( $\alpha=0.05$ ).

#### 5.11.4. Número de hojas

El número de hojas por planta para el cultivo de trigo en suelo arcilloso, presentó diferencias estadísticas ( $\alpha=0.05$ ) para los tratamientos con 40% de mucílago y 60% de agua, 50% de mucílago y 50% de agua, 60% de mucílago y 40% de agua (Figura 8). El promedio del número de hojas para los primeros tres tratamientos fue de 6.1, mientras que para el tratamiento con 10% de mucílago y 90% de agua fue de 4.2. Entonces, los mejores tratamientos para la variable número de hojas fueron con 40% de mucílago y 60% de agua, 50% de mucílago y 50% de agua y 60% de mucílago y 40% de agua.

Para el suelo arenoso (Figura 8), la variable altura de planta, el análisis de varianza ( $\alpha=0.05$ ) mostró diferencias estadísticas. Éstas se reflejaron en los tratamientos con 70% de mucílago y 30% de agua, 60% de mucílago y 40% de agua y 50% de mucílago y 50% de agua. Los tratamientos con 50% de mucílago y 50% de agua

y 60% de mucílago y 40% de agua estadísticamente son iguales, pero diferentes al tratamiento con 70% de mucílago y 30% de agua. Los valores para los tratamientos con 70% de mucílago y 30% de agua, 60% de mucílago y 40% de agua y 50% de mucílago y 50% de agua fueron los siguientes: 6.88, 5.22 y 5. Lo cual muestra que el mejor tratamiento fue con 70% de mucílago y 30% de agua.

La posibilidad de aumentar el rendimiento de grano a través del incremento de la tasa fotosintética es considerada con cierta frecuencia. Se esperaría que un incremento en la tasa de asimilación de CO<sub>2</sub> por la hoja se tradujera en mayor capacidad de acumular biomasa total y consecuentemente en mayor potencial de rendimiento de grano (Slafer *et al.*, 1996). Sin embargo, se ha encontrado que no hay asociación entre la tasa fotosintética y rendimiento; por ejemplo, se ha reportado que genotipos silvestres de bajo rendimiento tienen una tasa fotosintética más alta que cultivares modernos de alto rendimiento (Carver *et al.*, 1989; Jhonson *et al.*, 1987; Austin *et al.*, 1982). Más aún, cambios en la fotosíntesis involucran ajustes compensatorios entre el tamaño de la hoja y tasa fotosintética (Austin *et al.*, 1982).

Por otro lado, no se puede negar que tal vez la dificultad de establecer relaciones positivas entre fotosíntesis y rendimiento se deba a la multitud de otros factores que puedan influenciar el rendimiento. La presencia de evidencias, aunque indirectas, en estudios de sombreado, aclareo y área foliar, implican la innegable importancia de la fotosíntesis en el rendimiento (Fischer, 1975; Fischer y Laing, 1976). Por lo que un mejor entendimiento de las bases sobre la relación fotosíntesis y rendimiento son necesarios para el establecimiento de estrategias en el mejoramiento del rendimiento vía fotosíntesis.

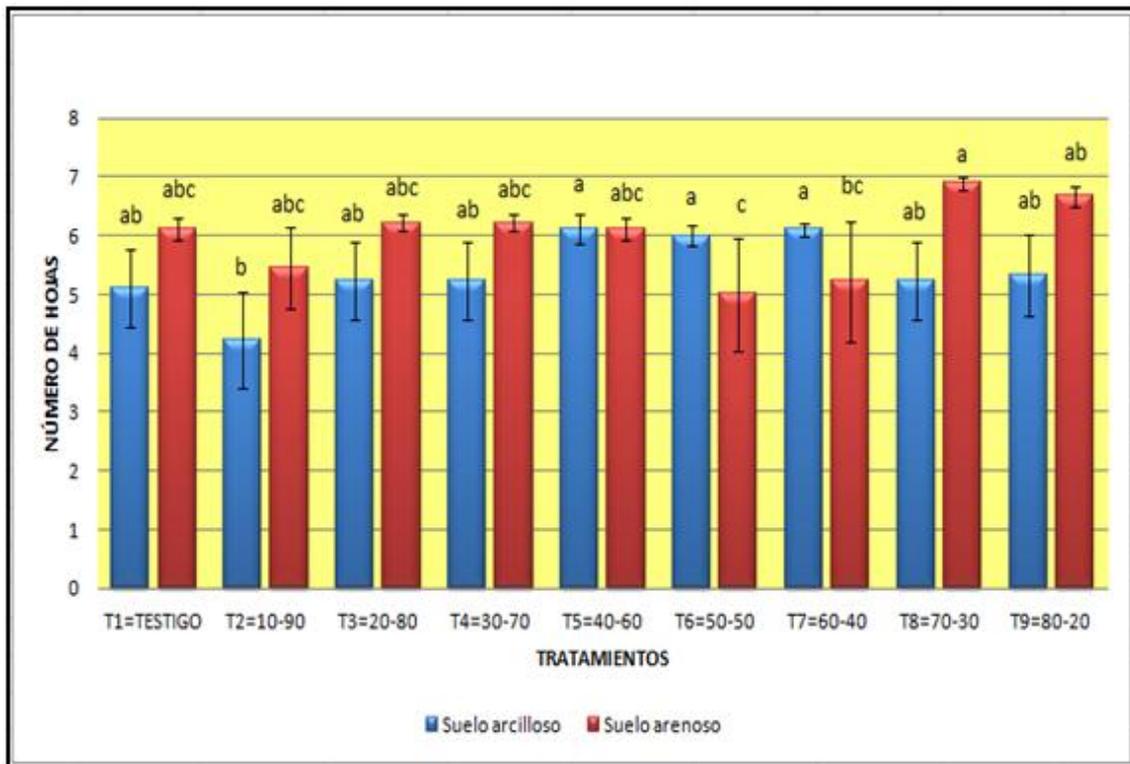


Figura 8. Número de hojas, para el cultivo de trigo en suelo de textura arcillosa y arenosa, bajo condiciones de invernadero.

\*Barras con la misma literal, para cada tipo de suelo, indican valores estadísticamente similares ( $\alpha=0.05$ ).

#### 5.11.5. Peso de grano

En el suelo con textura arcillosa (Figura 9) los tratamientos con 40% de mucílago y 60% de agua, 70% de mucílago y 30% de agua, Testigo y 10% de mucílago y 90% de agua presentaron diferencias estadísticas ( $\alpha=0.05$ ). El peso de los granos para cada uno de tratamientos mencionados fue el siguiente: 0.461, 0.283, 0.138 y 0.138, respectivamente. Como puede observarse, el mayor porcentaje de peso correspondió al tratamiento con 40% de mucílago y 60% de agua, seguido por el tratamiento con 70% de mucílago y 30% de agua y por último, los tratamientos Testigo y 10% de mucílago y 90% de agua.

Para el suelo arenoso (Figura 9), los tratamientos con 80% de mucílago y 20% de agua y 10% de mucílago y 90% de agua, presentaron diferencias estadísticas ( $\alpha=0.05$ ). El peso de los granos para cada uno de los tratamientos fue de 0.238 y de

0.116, respectivamente. El mejor tratamiento fue el de 80% de mucílago y 20% de agua.

El Peso del grano se define durante el período de llenado (Abbate et al., 1994). Ahora, las altas temperaturas durante el período de llenado, reducen el peso potencial del grano (Fischer y Hilleris-Lambers, 1978) y la duración del período de llenado (Wiegand y Cuellar, 1981), pero incrementan la tasa diaria de llenado (aumento en peso por grano por día) (Sofield *et al.*, 1974), produciendo un efecto compensatorio bajo ciertas circunstancias.

El llenado de los granos comienza pocos días después de floración. En esta etapa se incrementa el peso de los granos hasta alcanzar su madurez, quedando determinado el peso del grano y el rendimiento final del cultivo. El período crítico para la determinación del rendimiento en el cultivo de trigo coincide con el crecimiento de la espiga que se extiende desde la formación de espiguilla terminal hasta la antesis. El peso seco de las espigas en antesis es una medida del suministro de asimilados que recibieron las mismas durante el período crítico y por lo tanto es un adecuado indicador del número de granos que se fijarán. Es frecuente observar deficiencias hídricas durante el llenado, que provocan limitaciones de fuente y reducen el peso de los granos. En este caso no solo se disminuye el rendimiento sino que también se produce una merma de la calidad comercial del grano (Bertino *et al.*, 2010).

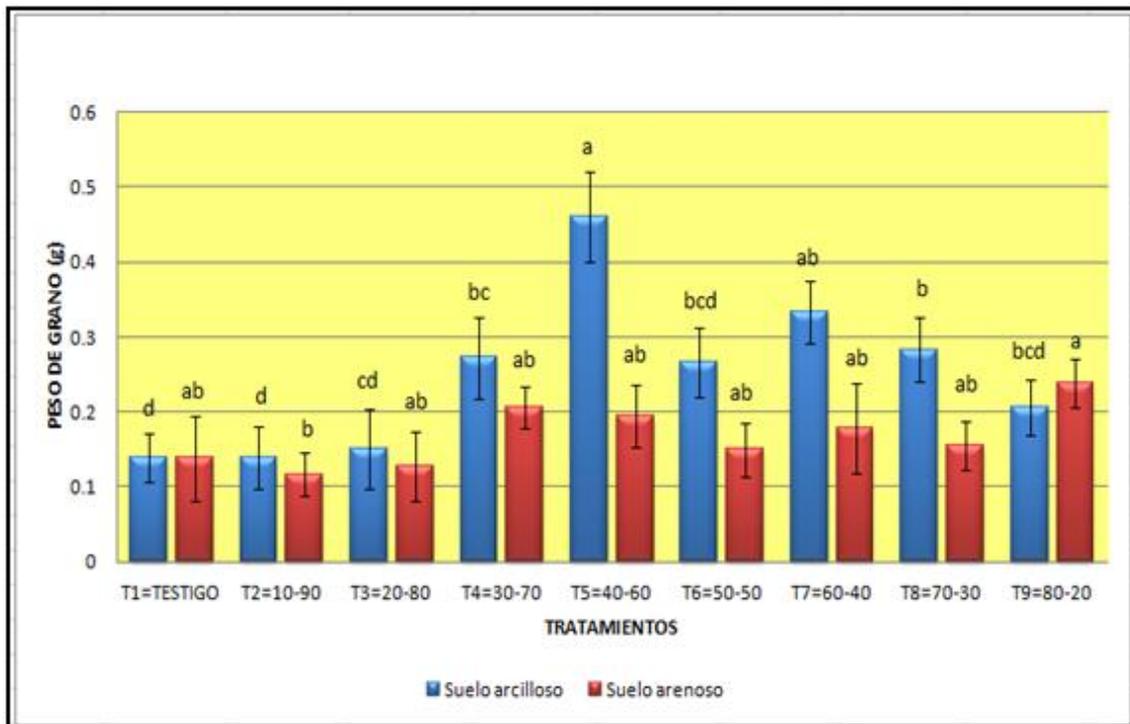


Figura 9. Peso seco de grano (g), para el cultivo de trigo en suelo de textura arcillosa y arenosa bajo condiciones de invernadero.

\*Barras con la misma literal, para cada tipo de suelo, indican valores estadísticamente similares ( $\alpha=0.05$ ).

#### 5.11.6. Número de semillas

La Figura 10, muestra los resultados obtenidos para el número de granos para en suelo arcilloso. El análisis de varianza mostró diferencias significativas ( $\alpha=0.05$ ) en los tratamientos con 40% de mucílago y 60% de agua, 50% de mucílago y 50% de agua, Testigo, 10% de mucílago y 90% de agua, 20% de mucílago y 80% de agua, cuyos valores se muestran a continuación: 10.778, 6.778, 2.889, 4.111 y 3.333, respectivamente.

En el suelo arenoso (Figura 10) hubo diferencias significativas ( $\alpha=0.05$ ) en la en los tratamientos con 30% de mucílago y 70% de agua y 80% de mucílago y 20% de agua que estadísticamente fueron iguales entre ellos, pero diferentes a los tratamientos Testigo y 10% de mucílago y 90% de agua. Sus valores se presentan a continuación: 6.222, 6.111, 3.0 y 2.778, respectivamente.

En un cultivo de trigo bajo condiciones normales, cada uno de los subcomponentes, que en conjunto describen el número de granos, alcanzan un máximo después del cual hay una considerable reducción o mortalidad (Fisher, 1984). No obstante, algunos autores (Austin *et al.*, 1980) han demostrado que un incremento en el potencial de rendimiento no está asociado a ningún componente. Otros autores han encontrado asociación positiva entre números de granos por m<sup>2</sup> con algunos componentes y no asociación con otros (Slafer y Andrade, 1991). Mientras que Waddington *et al.* (1986) y Siddique *et al.* (1989) reportan asociación positiva del número de granos por m<sup>2</sup> con número de granos por espiga. A pesar de que algunos cultivares modernos presentan un alto peso de grano, parece que los incrementos en el potencial de rendimiento de grano se deben principalmente al aumento en el número de grano por m<sup>2</sup> (Fischer y Stockman, 1980).

En general, el número de granos por m<sup>2</sup> está relacionado negativamente con el peso de grano. Slafer *et al.* (1996) en un análisis acerca de esta relación reportan que los cultivares modernos no sólo presentaron mayor número de granos por m<sup>2</sup> sino también menor peso de grano que cultivares antiguos. Esto implica que mientras el mejoramiento genético del rendimiento fue debido principalmente a un incremento en el número de granos por m<sup>2</sup>, el componente de peso de grano ejercía un efecto contrario. Esto sugiere que el mejoramiento genético futuro para incrementar el potencial de rendimiento de grano a través del incremento del número de granos por m<sup>2</sup> podría ser impedido o retardado por un efecto compensatorio de la reducción del peso de grano. Una posible explicación de esta relación negativa es que a mayor número de granos producidos, habrá menor cantidad de fotoasimilados para cada grano; conduciendo esto a una reducción en el peso de grano.

Otra explicación sería que el incremento del número de granos, es debido a un aumento en el número de granos por espiga, lo que conduciría a un mayor número de granos de menor peso. Esto implicaría un mayor número de granos en tallos tardíos, lo que en turno implica también menor peso de grano. Independiente de cual fuera la explicación más adecuada, lo cierto es que el conocimiento de las bases que determinan esta correlación negativa es esencial para poder asegurar mayor

probabilidad de éxito en el mejoramiento genético para incrementar el número de granos.

La definición del número de granos se produce a lo largo de las distintas etapas del cultivo y fundamentalmente dentro de la etapa reproductiva. Sin embargo, no todas esas etapas tienen igual importancia relativa en el logro del número de granos por m<sup>2</sup> ya que como ha sido antes mencionado anteriormente existe un período crítico para la definición de dicho componente (Fischer, 1984).

Siendo que la radiación afecta al número de granos a través de su relación lineal positiva con la tasa de crecimiento del cultivo, y la temperatura lo afecta negativamente, acelerando el desarrollo, es posible pensar que el número de granos (y en muchos casos el rendimiento) depende de estos factores durante el período crítico definido alrededor de anthesis.

El inicio de la elongación de los entrenudos determina un cambio en la partición de los asimilados dentro de la planta, los que destinan principalmente al crecimiento del tallo, cesando en consecuencia la producción de macollos. A partir de ese momento y dependiendo de los recursos disponibles, se producirá la mortandad de los mismos quedando definido al final de este proceso el número de espigas por unidad de área. Luego del comienzo de la elongación del tallo se inicia con el crecimiento de la espiga siendo éste uno de los procesos más críticos en la definición del rendimiento y particularmente del número de granos por espiga. Debido a que el tallo y la espiga crecen en forma coetánea en el tiempo durante la última etapa de la encañazón, la competencia por recursos entre ambos órganos es un aspecto crucial para el crecimiento de la espiga ya que es el órgano de mayor importancia en términos de rendimiento. Durante esta etapa, una mayor partición de asimilados hacia las espigas se traducirá en un mayor número de granos al momento de la cosecha. En términos generales el número de flores que se producen dentro de cada espiguilla en trigo no es una limitante ya que en la mayoría de los cultivares y para diferentes condiciones del ambiente se inician entre 9-10 primordios de flores. Sin embargo, sólo sobreviven entre 3-4 flores al momento de la floración. Así, si se compara en número de flores

fértiles respecto del total iniciadas es posible observar que entre 60-70% de las flores iniciadas mueren. La magnitud de dicha mortandad depende fundamentalmente de los recursos que se particionen hacia la espiga durante la última etapa de la encañazón.

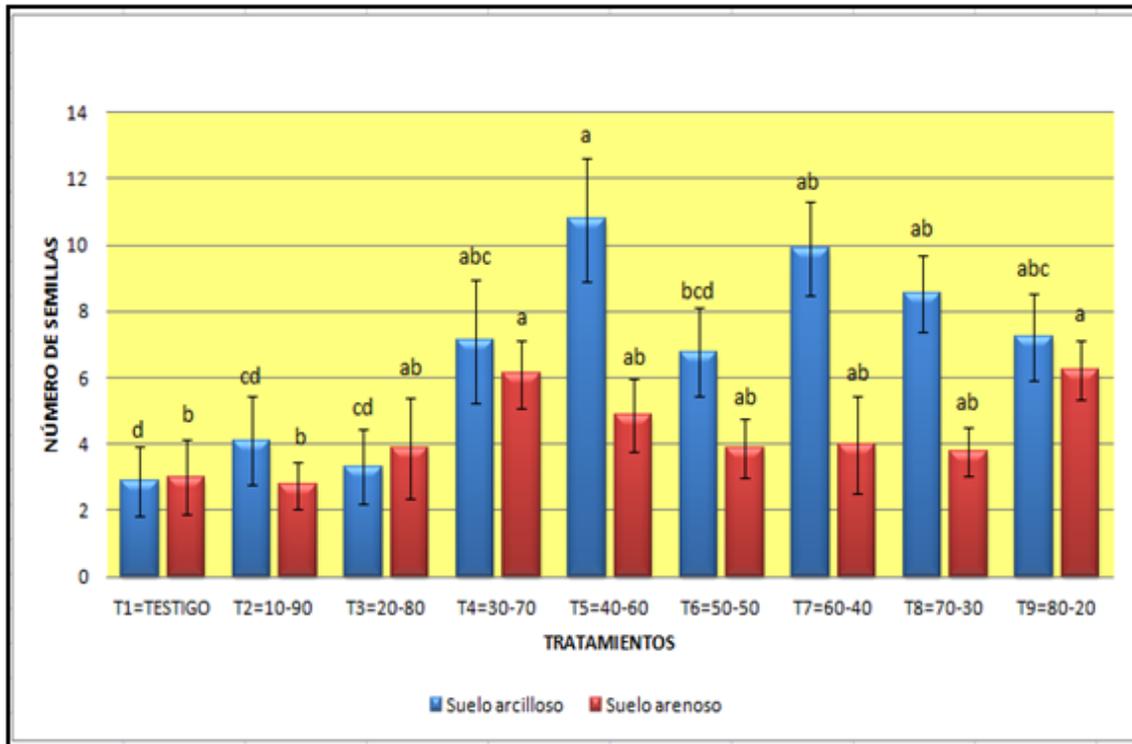


Figura 10. Número de semillas o granos para el cultivo de trigo en suelo de textura arcillosa y arenosa bajo condiciones de invernadero.

\*Barras con la misma literal, para cada tipo de suelo, indican valores estadísticamente similares ( $\alpha=0.05$ ).

### 5.11.7. Materia seca

Para el suelo arcilloso (Figura 11), se presentaron diferencias significativas en los tratamientos con 40% de mucílago y 60% de agua, 20% de mucílago y 80% de agua y 10% de mucílago y 90% de agua. Los valores para materia seca de cada uno de los tratamientos fue: 0.555, 0.333 y 0.272, respectivamente. El mejor tratamiento fue con 40% de mucílago y 60% de agua, seguido por el de 20% de mucílago y 80% de agua y por último el de 10% de mucílago y 90% de agua.

En el suelo arenoso (Figura 11), se presentaron diferencias estadísticas ( $\alpha=0.05$ ) en el tratamiento con 40% de mucílago y 60% de agua, que presentó el valor más alto con 0.555 g; siendo diferente a los tratamiento Testigo, con 10% de mucílago y 90% de agua y 20% de mucílago y 80% de agua, cuyos valores fueron los siguientes: 0.366, 0.272 y 0.333, respectivamente. Los tratamientos con 30% de mucílago y 70% de agua, 50% de mucílago y 50% de agua, 60% de mucílago y 40% de agua, 70% de mucílago y 30% de agua y 80% de mucílago y 20% de agua, estadísticamente fueron iguales entre ellos.

Los incrementos en el rendimiento de grano pueden ser atribuidos a cambios en el rendimiento biológico o biomasa total, índice de cosecha (rendimiento de grano sobre biomasa total) o ambos. La mayoría de los autores que han estudiado las bases fisiológicas del mejoramiento del rendimiento de grano han concluido que la biomasa aérea total a la madurez no ha sufrido cambios substancial es a través de la historia del mejoramiento genético de trigo (Austin *et al.*, 1980; McEwan y Cross, 1979; Sinha *et al.*, 1981; Waddington *et al.*, 1986; Cox *et al.*, 1988; Austin *et al.*, 1989).

Esto significa que la biomasa aérea total poco ha tenido que ver con el aumento en el rendimiento de grano. Si se considera que éste (una proporción de la materia seca producida) ha sido incrementado a través de mejoramiento genético y la biomasa aérea total solo ha sido ligeramente o no modificada, estos progresos en rendimiento son debidos a incrementos en el índice de cosecha. Se tienen soportes en donde se ha encontrado una fuerte asociación entre estos dos caracteres (Slafer y Andrade, 1993).

Hay algunos reportes de índices de cosecha del orden de 50% y se han mencionado valores hasta de 62% (Austin *et al.*, 1980). El mejoramiento del rendimiento de grano en el futuro puede ser acelerado o complementado si se utilizan algunos atributos fisiológicos, tanto en la selección de progenitores como en generaciones segregantes.

Sin embargo, el índice de cosecha como tal, no es un criterio de selección más práctico que el propio rendimiento de grano. Por tal motivo, se deberán buscar estrategias más prácticas como la proporción en peso tallo-espiga, peso de la espiga en antesis, etc. Un paso fundamental para incrementar el rendimiento vía índice de cosecha es el aumento en la producción de biomasa total. En trigo esto podría lograrse mediante el incremento de la radiación interceptada, lo que aumentaría la eficiencia en el uso de la radiación o ambas. Esto sería posible mediante la manipulación de características fisiológicas como la fotosíntesis, la respiración del cultivo y la distribución de la radiación en el dosel.

Sin dudas que las bajas disponibilidades hídricas y/o las fechas tardías de siembra, son factores que también determinan mermas importantes en los niveles de productividad granífera del cultivo. La falta de agua incrementa la mortandad de flores (Fischer, 1973) y origina una menor eficiencia de conversión de la radiación interceptada en Materia Seca (M.S.) (Whitfield y Smith, 1989), lo que contribuye a reducir el N° de granos/m<sup>2</sup> cuando este estrés se produce durante el período de crecimiento de la espiga (Abbate *et al.*, 1994).

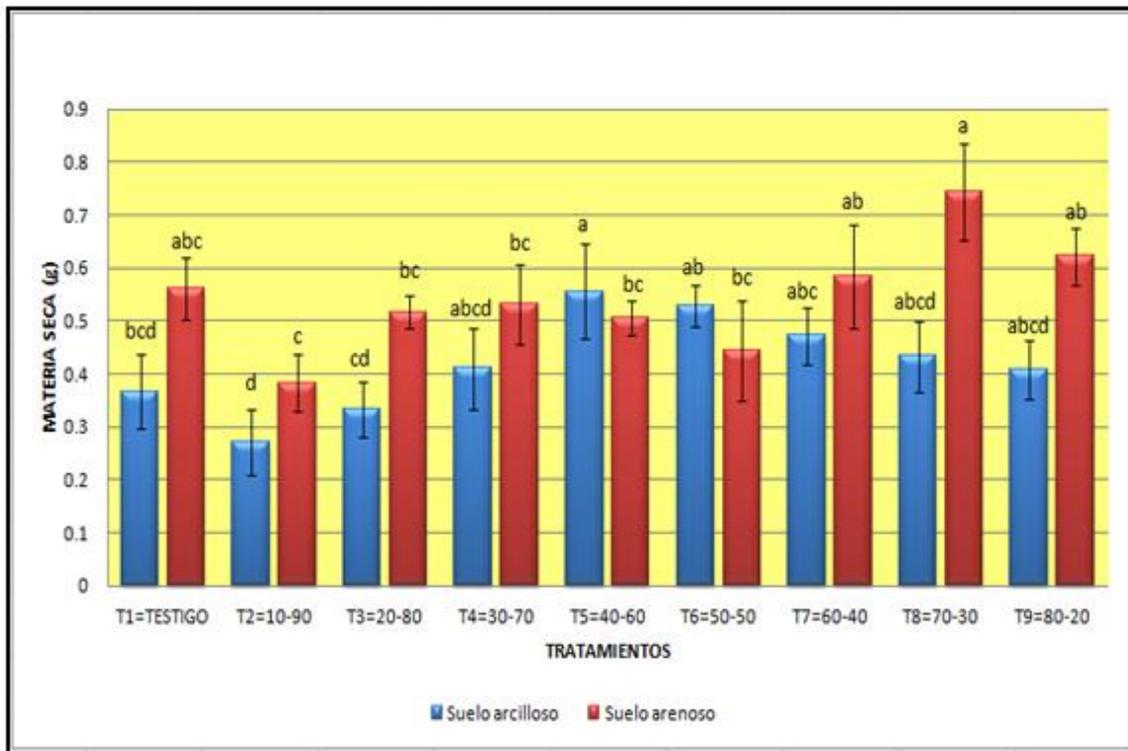


Figura 11. Materia seca (g) para el cultivo de trigo en suelo de textura arcillosa y arenosa bajo condiciones de invernadero.

\*Barras con la misma literal, para cada tipo de suelo, indican valores estadísticamente similares ( $\alpha=0.05$ ).

## 5.12. CONCLUSIONES

Los resultados de éste estudio permiten concluir, que en el suelo arcilloso, la cantidad de mucílago de nopal afectó de manera significativa todos los componentes de rendimiento del cultivo de trigo evaluados, que fueron: la cantidad de agua aplicada en el riego, altura de la planta, número de hojas, peso de la semilla o grano, número de semillas. El mejor tratamiento para los seis componentes de rendimiento mencionados, fue el tratamiento con 40% de mucílago y 60% de agua. Para la variable cantidad de agua aplicada y número de hojas, además del tratamiento con 40% de mucílago y 60% de agua, los tratamientos con 50% de mucílago y 50% de agua y con 60% de mucílago y 40% de agua presentaron diferencias significativas. Asimismo, las variables altura de planta y número de hojas presentaron diferencias significativas en el tratamiento con 60% de mucílago y 40% de agua. Por último, la variable cantidad de agua aplicada también fue afectada en el tratamiento con 80% de mucílago y 20% de agua.

En cuanto al estudio del suelo arenoso, las variables altura de planta, número de hojas y materia seca el mejor tratamiento fue el con 70% de mucílago y 30% de agua. Mientras que para las variables cantidad de agua aplicada, peso de grano y para el número de semillas, el mejor tratamiento fue con 80% de mucílago y 20% de agua. Además, las variables cantidad de agua aplicada y número de semillas fueron afectadas también por los tratamientos con 50% de mucílago y 50% de agua y con 30% de mucílago y 70% de agua respectivamente.

Las diferentes dosis del mucílago de nopal tanto en el suelo arcilloso como en el arenoso, tuvieron un efecto significativo en los componentes de rendimiento, cualidad que lo puede hacer útil en otros trabajos de investigación.

### 5.13. BIBLIOGRAFÍA

- Abbate, P. E., F. Andrade y J. P. Culot. (1994).** Determinación del rendimiento de trigo. *Boletín Técnico* Nº 133, INTA EEA Balcarce; Bs. As., Argentina: 5-17.
- Austin, R. B., C. L. Morgan, M. A. Ford y S. C. Bhagwat.1982.** Flag leaf photosynthesis of wheat (*Triticum aestivum* L.) and related diploid and tetraploid species. *Ann. Bot.* 49: 177.
- Austin, R. B., J. Binham, a.o. Blackwell, L.T. Evans, M. A. Ford, C. L. Morgan y M. Taylor.1980.** Genetic improvements in winter wheat yield since 1900 and associated physiological changes. *Journal of Agricultural Science.*94: 675.
- Austin, R. B., M. A. Ford y C. L. Morgan. 1989.** Genetic improvement in the yield of winter wheat: A further evaluation. *J. Agric. Sci.*162: 49.
- Bertino, G., Pizzani, S. Faraldo, ML. 2010.** Efectos del distanciamiento entre hileras sobre el llenado de grano en trigo de diferentes ciclos en la región semiárida pampeana. *Revista de la Facultad de Agronomía.* Vol 21.pp 48-49
- Bridges, I. G. y M. B. Wilkins.1973.** Morphology of the wheat plant. *In:* Ouinsenberry, K. S. and L. P. Reitz (ed.). "Wheat and wheat improvement". 1nd. ed. Madison, WI. USA, American Society of Agronomy. P. 89-116. (Agronomy No. 13)
- Briggle, L.W. 1967.** Morphology of the wheat plant. *In:* Ouinsenberry, K. S. and L.P. Reitz (ed.) *Wheat and wheat improvement.* 1st ed. Agronomy 13: 89-116.
- Bugbee, B. 1980.** Carbon use efficiency in optimal environments. SAE Technical Paper Series 891572, The engineering Society for Advance mobility Land Sea Air and Space, Warrendale PA. p. 1.
- Cambell, W. P., J. W. Lee, T. P. O'Brien, y M. G. Smart. 1981.** Endosperm morphology and protein body formation in developing wheat grain. *Aust. J. Plant Phys.* 8: 5-20.
- Carver. B. F., R. C. Jhonson y A. L. Rayburn.1989.** Genetic analysis of photosynthetic variation in hexploid and tetraploid wheat and their interspecific hybrids. *Photosynth. Res.* 20: 205.
- Christensen, B. T. 1992.** Physical fractionation of soil and organic matter in primary particle size and density separates. *Adv. Soil Sci.* 20: 1-90.
- Cook, R. J., y R. J. Veseth. 1991.** *Wheat health management.* St Paul Minnesota. APS Press.
- Cox T.8., Shoroger, J.P., Ben-Hui, L. Sears, R.G. y Martm, T.J. 1988.** Genetic improvement in agronomic traits of hard red winter wheat cultivars from 1919- 1987. *Crop. Sci.* 28: 756-760.
- Dayanandan, P., F. V. Hebard, V. D. Baldwin y P. B. Kaufman. 1977.** Structure of gravity-sensitive sheath and internodal pulvini in grass shoots. *Am. J. Bot.* 64:1189- 1199.
- Dornbos, D. L. Müllen, R. E. 1991.** Influence of stress during soybean seed fill on seed weight, germination and seedling growth rate. *Can. J. Plant Sci.* 71: 373-383.
- Dornbos, D. L., Müllen, R. E. y Shibes, S. R. M. 1989.** Drought stress effects during seed fill on soybean seed germination and vigor. *Crop Sci.* 29: 476-480.
- Esau, K. 1965.** *Plant anatomy.* 2<sup>nd</sup> ed. New York, John Wiley and Sons.
- Fischer, R. A. 1975.** Yield potential in a dwarf spring wheat and the effect of shading. *Crop. Sel* 15: 607-613.

- Fischer, R. A. 1984.** Growth and yield wheat. In Proceedings Symposium on potential productivity of field crops under different environments. International Rice Research Institute, Los Baños, Philipinas, pp. 129-154.
- Fischer, R. A. 1984.** Wheat. *In*: Smith, W. H. and S. J. Banta. "Symposium on productivity of field crops under different environments". Los Baños, Filipinas, International Rice Research Institute. p. 129-153.
- Fischer, R. A. 1985.** Number of kernels in wheat crops and the influence of solar radiation and temperature. *J. Agrie. Sei.* 100: 447-461.
- Fischer, R. A. y D. R. Laing. 1976.** Yield potential in a dwarf spring wheat and responses to crop thinning. *J. Agrie. Sei.* 87: 113-859.
- Fischer, R. A. y Y. M. Stockman. 1980.** Kernel number per spike in wheat (*Triticum aestivum* L.): responses to pre-anthesis shading. *Aust. J. Plant Physiol.* 7: 169.
- Fischer, R. A. y D. Hilleris-Lambers. (1978).** Effects of environment and cultivar on source limitation to grain weight in wheat. *Aust. J. Agric. Res.* 29: 443-458.
- Franca, N. J. B., Krzyzanowski, F. C., Henning, A. A., West, S. H. Miranda, L. C. 1993.** Soybean seed quality as affected by shriveling due to heat and drought stresses during filling. *Seed Sci. Technol.* 21: 107-116.
- Ghassemi, G. K., Soltani, A. Atashi, A. 1997.** Effect of water limitation in the field on seed quality of maize and sorghum. *Seed Sci Technol.* 25: 321-323.
- Gifford, R. M., J. H. Thorne, W. D. Hitz, y R.T. Guianquinta. 1984.** Crop productivity and photoassimilate partitioning. *Seienee* 225 :801.
- Green, C. F. 1989.** Genotypic differences in growth of *Triticum aestivum* in relation to absorbed solar radiation. *Field Crop Res.* 19:285.
- Hassink, J. A. P. Whitmore. 1997.** A model of the physical protection of organic matter in soils. *Soil Sci. Am. J.* 61: 131-139.
- Haun, J. R. 1973.** Visual qualification of wheat development. *Agron. J.* 65:116-119.
- Heatherly, L. G. 1993.** Drought stress and irrigation effects on germination of harvested soybean seed. *Crop Sci.* 33: 777-781.
- Innes, P. y R. D. Blackwel1.1983.** Some effects of leaf posture on the yield and water economy of winter wheat. *J. Agric. Sci.* 23:945.
- Jhonson, R. C., H. Kebede, D. W. Mornhinweg, B. F. Carver, A. L. Rayburn y H. T. Nguyen. 1987.** Photosynthetic differences among *Triticum* accessions at tillering. **Crop Sci.** 27: 1 046.
- Kiniry, J. R., C. A. Jones, J. C. O'Toole, R. Blanchet, M. Cabelguenne y D. P. Aikman. 1989.** Radiation-use efficiency in biomass accumulation prior to grain filling for five grain crop species. *Field Crop Res.* 20: 51.
- Kirby, E. J. M. y M. Appleyard. 1986.** Cereal development guide. 2<sup>nd</sup> ed. Stoneleigh, Englend, Plant Breeding Institute. (Arable Series).
- Large, E. C. 1954.** Growth stages in cereals. Illustration of the "Feekes" scale. *Plant Pathology* 3: 128-129.
- Lee, D. R. y P. T. Atkey. 1984.** Water loss from the develop caryopsis of wheat wheat (*Triticum aestivum* L.). *Can. J. Bol.* 62:1314-1326.
- Lersten, N. R. 1987.** Morphology and anatomy of the wheat plant. *In*: Heyne, E. G. (ed.). "Wheat and wheat improvement". Madison, WI, USA, American Society of Agronomy. P.33-75. (Agronomy No.13.).

- Lin, T. Y. Markhart, A. H. 1996.** *Phaseolus acutifolius* a gray is more heat tolerant than *P. vulgaris* L. in the absence of water stress. *Crop Sci.* 36: 110-114.
- Machado, S.; Bynum, E.D.; Archer, T.L.; Lascano, R.J.; Wilson, L.T.; Bordovosky, J.; Segarra, E.; Bronson, K.; Nesmith, D.M.; Xu, W. 2002.** Spatial and Temporal Variability of Corn Growth and Grain Yield: Implications for Site-specific Farming. *Crop Sci.* 42, 1564-1576.
- Mallarino, A. P.; Oyarzabal, E. S., Hinz, P. N. 1999.** Interpreting Within-field Relationships Between Crop Yields and Soil and Plant Variables Using Factor Analysis. *Precision Agric.* 1, 15-25.
- Marcellos, H. and W. V. Single. 1972.** The influence of cultivar, temperature and photoperiod on post-flowering development of wheat. *Aus. J. Agric. Res.* 23:533-540.
- Martínez-Garza, A. 1988.** Diseños experimentales. Ed. Trillas. México, D.F. 756 p.
- McDonald, G. K., Gene, Y., Nurzhanuly, B., Trethowan, R., Reynolds, M.P., Yaquib**
- McEwan, J. M. y R. J. Cross.1979.** Evolutionary changes in New Zeland wheat cultivars. New Delhi, India, Proceedings Fifth International Wheat Genetic Symposium. p.198-203.
- Miki, N. K., K. J. Clarke y M. E. McCully. 1980.** A histological and histochemical comparison of the mucilages on the root tips of several grasses. *Am. J. Bot.* 67: 1361- 1373.
- Miralles, D. J. y G. A. Slafer. (1999).** Wheat development In: "Wheat: Ecology and Physiology of Yield Determination" (E.H. Satorre & G.A. Slafer, Eds), ISBN 1-56022 874-1, Food Product Press, New York, pp: 13-43. pp. 487-496).
- Mujahid, M., Eagles, H., Oldach K.H., Mather D.E. Wallwork, H. 2008.** Quantifying the value to grain yield of QTL for adaptation and tolerance to abiotic stress in bread wheat. Proceedings of the 11th International Wheat Genetics Symposium. Brisbane Convention and Exhibition Centre, Brisbane, Queensland, Australia. August 24-29. 3 p.
- Rawson H. M., H. M. Hindmarsh, R. A. Fischer y Y. R. Stockman. 1983.** Changes in leaf photosynthesis with plant ontogeny and relationships with yield per ear in wheat cultivars and 120 progeny. *Aust. J. Plant Phys.* 10:503.
- Rawson, H. M. y A. K. Baddega. 1979.** Influence of temperature between floral initiation and flag leaf emergence on grain number in wheat. *Aus. J. Plant Phys.* 6:391-400.
- Rawson, H. M.1970.** Spikelet number, its control and relation to yield per ear. *Aus. J. Biol. Res.* 23: 1-5.
- Rebolledo R., H. H. 2002.** Manual SAS por computadora, análisis estadístico de datos experimentales. Ed. Trillas. México.
- Sánchez, J. E., Harwood, R. R., Willson, T. C., Kizilkaya, K., Smeenk, J., Parker, E., Paul, E. A. Knezek, B. D., Robertson, G. P., 2004.** Managing soil carbon and nitrogen for productivity and environmental quality. *Agron. J.* 96, 769-775.
- Siddique, K. H. M., E. J. M. Kirby y M. W. Perry. 1989.** Ear-to-stem ratio in old and modern wheats, relationship with improvement in number of grains per ear in yield. *Field Crop Res.* 21 :59-78.
- Sierra, C., 1990.** Fertilidad de los suelos en cero labranza. En: Primeras Jornadas Binacionales de Cero Labranza. Sociedad de Conservación de Suelos de Chile. Concepción, Oct. 1990. Pp: 197-211.

- Simmons, S. R. 1987.** Growth, development and physiology. *In:* Heyne, E. G. (ed). "Wheat and wheat improvement". Madison, WI., USA, American Society of Agronomy. p. 77-113. (Agronomy No. 13).
- Sinha, S. K., P. K. Aggarwal, G. S. Chaturvedi, K. R. Koundal y R. Chopra. 1981.** A comparison of physiological and yield characters in old and new wheat varieties. *J. Agric. Sci.*97:233.
- Slafer, G. A. y F. H. Andrade. 1991.** Genetic improvement in bread wheat (*Triticum aestivum* L.) yield in Argentina. *Field Crop Res.* 21 : 289-296.
- Slafer, G. A. y H. M. Rawson. 1995.** Rates and cardinal temperatures for processes of development in wheat: Effects of temperature and thermal amplitude. *Aus. J. Plant Phys.* 22:913-926.
- Slafer, G. A., D. F. Calderini y D. J. Miralles. 1996.** Yield components and compensation in wheat: Opportunities for further increasing yield. *In:* Reynolds, M. P., S. Rajaram and A McNab (eds.). "Increasing the grain yield potential in wheat: breaking the barriers". México D. F., México, Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo. p. 101-133.
- Slafer, G. A. y F. H. Andrade. 1993.** Physiological attributes related to the generation of grain yield in bread wheat cultivars released at different eras. *Field Crop Res.* 31 : 351.
- Slafer, G. A., y F. H. Andrade. 1991.** Changes in physiological attributes of the dry matter economy of bread wheat (*Triticum aestivum* L.) through genetic improvement of grain yield potential at different regions of the world. A review. *Euphytica* 58:37.
- Slafer, G.A., Abeledo, L.G., Miralles, D.J., González, F.G. y Whitechurch, E.M. (2001).** Photoperiod sensitivity during stem elongation as an avenue to rise potential yield in wheat. *En "Wheat in a Global Environment"* [Z. Bedo & L. Láng, Eds], ISBN 0 7923-6722-7, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht,
- Slafer, GA y Rawson, H.M. 1994.** Sensitivity of wheat phasic development to major environmental factors: a re-examination of some assumptions made by physiologists and modellers. *Aust. J. Plant. Phys.* 21 :393-426.
- Sofield, I., L. T. Evans, M. G. Cook y I. F. Wardlaw. (1974).** Factors influencing the rate and duration of grain filling in wheat. *Aust. J. Plant Physiol.* 4: 785-797.
- Thornley, J. H. M. 1970.** Respiration, growth and maintenance in plants. *Nature* 227: 304.
- Vlek, P., Filler, R., Burford, J., 1981.** Fate of nitrogen in arid soils. *Plant and Soil*, 58, 133-175.
- Waddington, S. R., J. K. Ransom, M. Osmanzai y D. A. Saunders. 1986.** Improvement in yield potential of bread wheat adapted to northwest Mexico. *Crop. Sci.* 26:698.
- Wettstein-Knowles, P. van. 1974.** Ultrastructure and origin of epicuticular wax tubes. *J. Ultrastruct. Res.* 46:483-498.
- Whitfield, D. M. y C. J. Smith. (1989).** Effects of irrigation and nitrogen on growth, light interception and efficiency of light conversion in wheat. *Field Crop Res.* 20: 279-295.

- Wiegand, C. L. y J. A. Cuellar. 1981.** Duration of grain filling and grain kernel weight of wheat as affected by temperature. *Crop. Sci.* 21: 95-101.
- Wiegand, C. L. y J. A. Cuellar. (1981).** Duration of grain filling and kernel weight of wheat as affected by temperature. *Crop Science* 21: 95-101.
- Zadoks, J. C., T. T. Chang y C. F. Konzak. 1974.** A decimal code for the growth stages of cereals. *Weed Research.* 14:415-421.

## VI. DOSIS DE MUCÍLAGO DE NOPAL (*Opuntia spp.*) EN LA EVALUACIÓN MICROESTRUCTURAL DEL SUELO.

### 6.1. RESUMEN

El presente estudio evaluó diferentes dosis de mucílago de nopal, que fueron: Testigo (sin mucílago, únicamente con agua), T10-90, T40-60 y T80-20; donde, la primera cantidad corresponde al porcentaje de mucílago de nopal y la segunda al porcentaje de agua, formando ambas cantidades la solución aplicada a los suelos, los cuales se depositaron en cajas magenta. Los suelos utilizados fueron: uno de textura arcillosa, que se recolectó en el INIFAP de Celaya, Guanajuato y el segundo, de textura arenosa, recolectado en los terrenos del Colegio de Postgraduados, Montecillo, Méx. Una vez que se aplicaron los diferentes tratamientos a los suelos arcilloso y arenoso, las cajas magenta se colocaron en una cámara de ambiente controlado a una temperatura de 25 °C y humedad relativa de 40%. En el transcurso del experimento se realizaron tres muestreos; a los 7, 14 y 21 días después de la aplicación del mucílago, para poder evaluar sus efectos de las diferentes dosis en ambos suelos arcilloso y arenoso.

Se evaluaron a nivel micromorfológico los componentes básicos o las unidades más simples en secciones delgadas, como son: componentes básicos, componentes minerales, masa basal, color de la masa, huecos, agregación y tipo de microestructura. Los resultados para el suelo arcilloso, mostraron que el aporte de mucílago sobre las propiedades microestructurales, es perceptible en periodos de tiempo relativamente cortos. Así lo demuestran los resultados observados en las láminas delgadas para los tres tiempos de muestreo (7, 14 y 21 días). Mientras que en el suelo arenoso no se observa cambio alguno en su composición microestructural por adiciones de dosis de mucílago.

**Palabras clave:** *micromorfología, agregación, secciones delgadas, tipo de microestructura.*

## 6.2. ABSTRACT

This study evaluated different doses of nopal mucilage, which were: Control (without mucilage with water only), T10-90, T40-60 and T80-20, where the first number corresponds to the percentage of cactus mucilage and second to the percentage of water, forming the solution both amounts applied to soils, which are placed in magenta boxes. The soils used were: a clay texture, which was collected in the INIFAP of Celaya, Guanajuato and second, sandy texture, gathered in the grounds of the Graduate College, Montecillo, Mex. Once the different treatments were applied to loam and sandy soils, magenta boxes were placed in a controlled environment chamber at a temperature of 25 ° C and 40% relative humidity. In the course of the experiment were three samples, at 7, 14 and 21 days after application of the mucilage, to evaluate the effects of different doses in both clay and sandy soils.

Micromorphologic evaluated at the basic components or simpler units into thin sections, including: basic components mineral components basal mass, mass color, holes, aggregation and type of microstructure. The results for the clay soil, showed that the contribution of slime on the microstructural properties, is detectable in a relatively short time periods. This is demonstrated by the results observed in thin films for the three sampling times (7, 14 and 21 days). While in the sandy soil was not observed any change in its composition microstructural mucilage dose additions.

**Keywords:** *micromorphology, aggregation, thin sections, type of microstructure.*

### 6.3. INTRODUCCIÓN

La estructura del suelo no puede verse directamente en tres dimensiones, debido a que los materiales del suelo son en gran parte opacos. Por lo tanto, su observación es un reto en sí mismo. El primer método que permitió la visualización de la estructura del suelo fue el método de la sección delgada. Un núcleo de suelo es impregnado por una resina que penetra en el sistema de poros a los dominios de diferentes tamaños, dependiendo de su viscosidad. A continuación se corta y es tratada de tal manera, que se produzca, ya sea una superficie plana o en forma de una sección delgada, del orden de espesor de 15 micras. Las secciones delgadas son entonces observadas y fotografiadas con un microscopio petrográfico (Velde y Barré, 2010).

La estructura del suelo corresponde a la organización tridimensional de las partículas sólidas y el espacio de los poros. En los suelos, las partículas sólidas (partículas minerales y moléculas orgánicas) están asociadas en agregados. Debido a que los minerales de arcilla, por su alta reactividad, interactúan fuertemente con moléculas orgánicas y son muy eficientes en la construcción de los agregados (Carter, 2004). Virto *et al.* (2008) mostró que las fracciones de arcilla (<2  $\mu\text{m}$ ) de los agregados de tamaño del limo se enriquecen en minerales de arcilla en comparación con las arcillas "libres" en el suelo. Entre las moléculas orgánicas, polisacáridos exudados por microorganismos o raíces, tienen una función central en la formación de agregados y su estabilidad (Velde y Barré, 2010).

La agregación se inicia cuando dos partículas minerales o una partícula mineral y una molécula orgánica se unen entre sí. Debido a la alta reactividad de los minerales de arcilla, éstos interactúan con otros y con moléculas orgánicas. Por consiguiente, son de importancia primaria para la formación de agregados. Se ha observado que la adsorción de moléculas orgánicas cargadas negativamente sobre minerales de arcilla incrementa la estabilidad coloidal. Ellos postularon que la adsorción de moléculas de carga negativa en la carga positiva de borde- sitio de las capas de arcilla se invierte la

carga de positivo a negativo y evita que el borde-cara interactúe con los minerales de arcilla (Velde y Barré, 2010).

La estabilidad de los agregados, es decir, su presencia durante un período de crecimiento o más, se determina por la velocidad de destrucción del material orgánico que unen las partículas del suelo. Cuanto menores son las moléculas, menos material húmico se encuentra dominado por enlaces C-C, más rápidamente serán destruidos por la acción bacteriana. Por lo tanto, los exudados de raíces y los productos de exudación bacteriana de menor peso molecular y menor cantidad de ácidos húmicos en la naturaleza, son fundamentales para la formación de agregados, pero sujetos a un tiempo medio de vida corta, debido a su vulnerabilidad a la acción bacteriana. Los agregados y su estructura en los suelos pasan a formar parte de un sistema muy dinámico, que depende de la renovación de los materiales vivos presentes, como las raíces y las bacterias que degradan residuos vegetales. La renovación constante es la regla, y puesto que la mayoría de la materia es aportada por las plantas, de una u otra manera, ellos son los agentes principales de la formación de agregados y de su mantenimiento (Velde y Barré, 2010).

Una visión simplificada de los procesos órgano - minerales en los suelos se puede dar como sigue: la materia orgánica es transformada por bacterias en gases y por el alto contenido de moléculas de carbono (moléculas de materia húmica). Los agentes de unión más eficientes son moléculas menos húmicas producidas por la exudación de las raíces de las plantas o por la acción de las bacterias. Sin embargo, estas moléculas ricas, pero con menos carbono, son químicamente activas debido a sus grupos funcionales externos y tienen una vida útil más corta debido a la acción bacteriana final. Los agentes cementantes necesitan ser renovados en los suelos, con el fin de mantener una estructura arcillosa sólida, que forman los agregados a través de una estructura orgánica (Velde y Barré, 2010).

## **6.4. MATERIALES Y MÉTODOS**

Para llevar a cabo los trabajos experimentales, se optó por realizarlos en dos tipos de suelo, que de acuerdo a su textura, se clasificaron en suelo arcilloso y suelo arenoso. La descripción de los sitios de recolección, se mencionan a continuación:

### **Descripción de la zona de recolección del suelo arcilloso**

El suelo se recolectó en el Campo Experimental Bajío (CEBAJ), perteneciente al Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). El CEBAJ se localiza en Celaya, Guanajuato, entre los paralelos 20° 30' 57" y 20° 36' 34" Norte y los meridianos 100° 49' 20" y 101° 06' 40" Oeste. Los usos de suelos dominantes en la zona son la agricultura de riego, la agricultura de temporal y la ganadería extensiva (INEGI, 1988b).

### **Descripción de la zona de recolección del suelo arenoso**

El área de recolección del suelo arenoso se localiza en el Colegio de Postgraduados, dentro de las coordenadas geográficas: 19° 22' y 19° 37' de latitud Norte y entre los 98° 54' y 99° 03' de longitud Oeste, con una altitud de 2240 m.s.n.m.

Para realizar la homogeneización de las muestras de suelo; primeramente se procedió a secarlas a temperatura ambiente, posteriormente se realizó su molienda de forma manual. Una vez realizado lo anterior, se procedió a su homogeneización, utilizando el tamiz del número 10, con apertura de malla de 2 mm.

#### **6.4.1. Unidades experimentales**

Las unidades experimentales constaron de cajas magenta con capacidad para 400 mL, a las cuales se les agregaron 200 g de suelo por unidad experimental, tanto para el suelo arcilloso como para el suelo arenoso.

### 6.4.2. Tratamientos

Para cada uno de los suelos se evaluaron cuatro tratamientos (Cuadros 3 y 4). Para su determinación, se consideró el perfil de humedad del suelo (Figuras 12, 13 y 14), por lo que fue necesario determinar las constantes de humedad; capacidad de campo (CC) y punto de marchitamiento permanente (PMP) en laboratorio. Una vez definidos estos parámetros, se procedió al cálculo del porcentaje de humedad aprovechable y realizar los cálculos de los tratamientos.

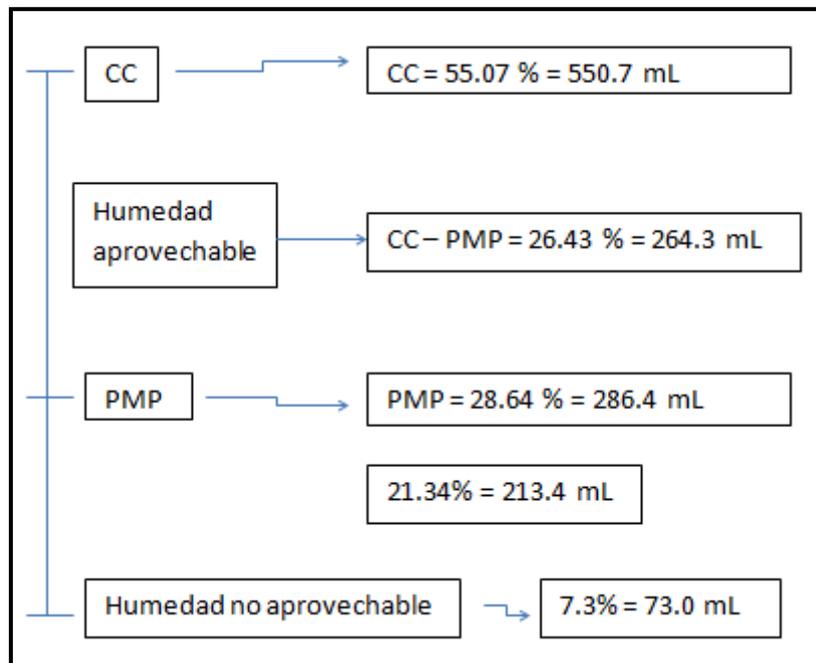


Figura 12. Perfil de humedecimiento del suelo arcilloso con las constantes de humedad, capacidad de campo (CC) y punto de marchitamiento permanente con la humedad aprovechable y no aprovechable.

Cuadro 3. Tratamientos aplicados al suelo arcilloso, para la primera columna tenemos que: T= Tratamiento, la primera cantidad corresponde al porcentaje de mucílago, la segunda al porcentaje de agua.

Tratamiento	Cantidad de mucílago (mL)	Cantidad de agua (mL)	Mucílago + agua (mL)	Diferencial de agua (mL)	Total de mL aplicados
T1=testigo	0	52.86	52.86	42.68	95.54
T2=10-90	5.28	47.58	52.86	42.68	95.54
T3=40-60	21.14	31.72	52.86	42.68	95.54
T4=80-20	42.29	10.57	52.86	42.68	95.54

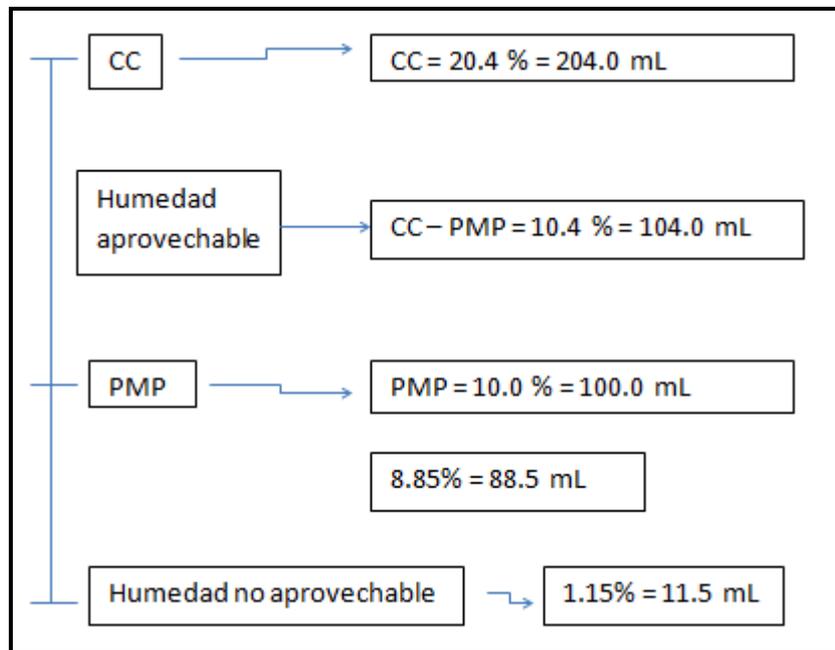


Figura 13. Perfil de humedecimiento del suelo arenoso con las constantes de humedad, capacidad de campo (CC) y punto de marchitamiento permanente con la humedad aprovechable y no aprovechable.

Cuadro 4. Tratamientos aplicados al suelo arenoso, para la primera columna tenemos que: T= Tratamiento, la primera cantidad corresponde al porcentaje de mucílago, la segunda al porcentaje de agua.

Tratamiento	Cantidad de mucílago (mL)	Cantidad de agua (mL)	Mucílago + agua (mL)	Diferencial de agua (mL)	Total de mL aplicados
T1=testigo	0	20.80	20.8	17.10	37.9
T2=10-90	2.08	18.72	20.8	17.10	37.9
T3=40-60	8.32	12.48	20.8	17.10	37.9
T4=80-20	16.64	4.16	20.8	17.10	37.9

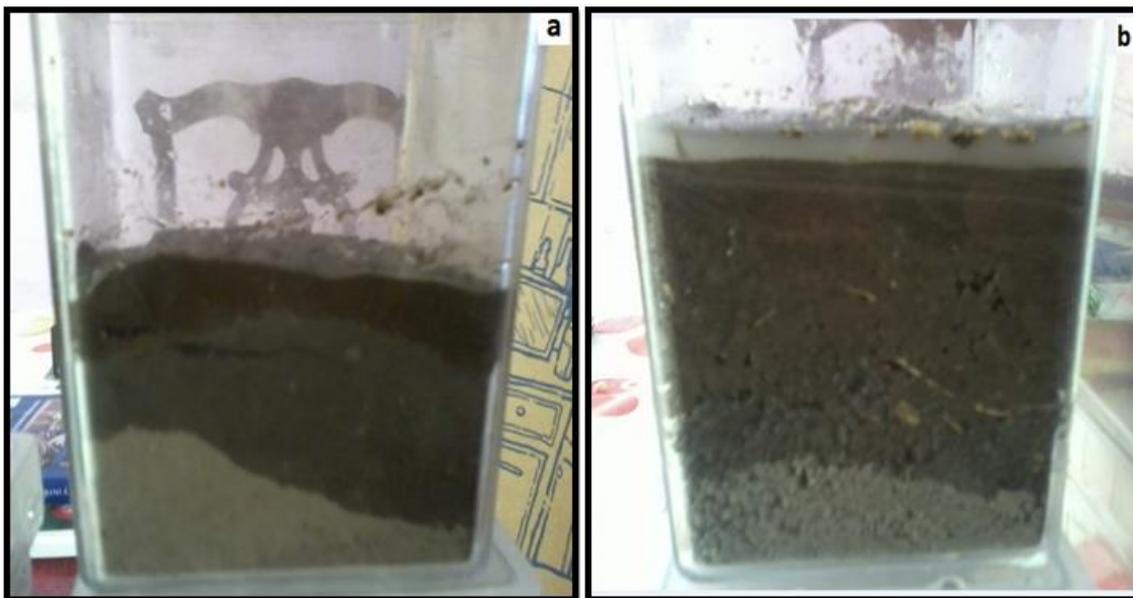


Figura 14. Cajas magenta con 200 g de suelo: a) suelo arenoso y b) suelo arcilloso. Utilizadas para los diferentes tratamientos de mucílago de nopal y su humedecimiento gradual.

#### 6.4.3. Cámara de ambiente controlado.

El experimento se realizó en una cámara de ambiente controlado marca Sherer, modelo Cel 3714 (Figura 15), en las instalaciones del Postgrado de Botánica del C.P. A una temperatura de 25 °C y humedad relativa de 40%. La duración del experimento fue de 21 días, se realizaron tres muestreos a los 7, 14 y 21 días después de la aplicación de mucílago de nopal.



**Figura 15. Cámara de ambiente controlado ubicada en el Postgrado de Botánica del C.P. Montecillo. Méx.**

#### 6.4.4. Análisis de imágenes

La micromorfología del suelo estudia bloques o secciones delgadas (25-30  $\mu\text{m}$  de grosor) bajo el microscopio petrográfico. El análisis de imágenes se realizó con un equipo compuesto por un microscopio y una computadora impulsada por una técnica que permite a los investigadores estudiar objetos de interés como características en una imagen digital. Las aplicaciones de análisis de imágenes para medir la estructura del suelo, son cada vez más comunes (Jongorius *et al.*, 1972; Ismail, 1975; Murphy *et al.*, 1977ab; Ringrose-Voase y Bullock, 1984; McKeague *et al.*, 1987; Shipitalo y Protz, 1987; Bui y Mermut, 1989; Moran *et al.*, 1989).

Las cajas magenta con las muestras de suelo fueron llevadas al laboratorio para su secado, posteriormente endurecerlas con una resina líquida y tener un bloque compacto, listo para la obtención de las láminas delgadas por medio de las técnicas tradicionales de petrología. Se analizaron con un microscopio petrográfico marca Olympus con aumento de 2 hasta 20x y se describieron en base al manual elaborado por Bullock *et al.* (1985).

Entre las características micromorfológicas propuestas para la evaluación del experimento se consideraron las siguientes:

**Componentes básicos:** Son las unidades de contextura más simples existentes en el suelo, por ejemplo, granos de arena, partículas de arcilla, fragmentos de plantas, etc.

**La masa basal:** Es un término general que se usa para el material grueso y fino que forma la base material del suelo y que no forma parte de los edaforrasgos. La descripción de la masa basal incluye los siguientes conceptos: color de la masa basal, huecos, agregación, microestructura y contextura birrefringente del material fino (micromasa).

**Color de la masa basal:** El color de la masa basal del suelo es muy variable, el color rojo indica la presencia de compuestos de Fe dispersos. El pardo amarillento indica compuestos de hierro hidratados dispersos, goethita y lepidocrocita. El color pardo a pardo muy oscuro es debido generalmente a la materia orgánica. El color gris representa el color de muchos minerales, como las arcillas, feldespatos y carbonatos.

**Los huecos** Representan el espacio poroso de los suelos, ocupado por el aire y el agua. En lámina delgada aparecen incoloros con sólo el polarizador y al colocar el analizador se ven negros (incluyen la resina isótropa usada para obtener el bloque endurecido de la muestra de suelo).

**La agregación:** donde los constituyentes elementales del suelo (arenas, limos, arcillas, materiales orgánicos, etc.) no se presentan aislados sino que se encuentran unidos entre sí formando agregaciones. Estos agregados son observables a nivel macromorfológico donde pueden ser analizados de una manera más exhaustiva en el

microscopio, tal es el caso o directamente en el perfil del suelo. La agregación edáfica se describe con base a los tipos de agregados, huecos y microestructuras.

Por el tipo de agregado son:

- **Migajosos.** Agregados porosos de formas más o menos esferoidales.
- **Granulares.** Agregados no porosos de formas con tendencias esferoidales.
- **En bloques angulares.** Agregados constituidos por caras, más o menos planas, que al cortarse forman aristas y estas a su vez originan vértices. En definitiva, presentan formas parecidas a poliedros geométricos irregulares. Las caras de los agregados encajan bien con las caras de los agregados vecinos.
- **En bloques subangulares.** Similares a los anteriores pero los bloques se encuentran menos definidos. Las caras no son tan planas, las aristas son rombas y apenas hay vértices. Los agregados tampoco encajan tan bien como en la microestructura de bloques angulares.
- **Prismáticos.** Bloques angulares, a manera de prisma, en los que predomina una dimensión (la vertical) con respecto a las otras dos. Normalmente son demasiado grandes como para poderlos observar en el microscopio.
- **Laminares.** Agregados de forma hojosa en los que una dimensión es mucho más corta (la vertical) que las otras dos.

En función de su grado de desarrollo; está determinada según la intensidad que se manifiestan los agregados. Para el suelo arcilloso, corresponde a agregados moderadamente desarrollados. En función de su grado de acomodación; Definen según el grado con que las caras adyacentes se amoldan unas a otras.

Tipos de microestructuras; Es la estructura que muestra el suelo bajo el microscopio. Está relacionada con el tamaño, forma y disposición de las partículas primarias y los huecos en materiales agregados y no agregados, según el tamaño, forma y disposición de cualquier agregado presente. Microestructuras ni agregadas ni arenosas; Dentro de éstas encontramos la masiva, que se distingue por estar formada sin agregados separados, material muy denso, sin poros.

## 6.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 6.5.1. Descripción de láminas delgadas para el primer muestreo de suelos con textura arcillosa y arenosa con diferentes dosis de mucílago de nopal

#### 6.5.1.1. Suelo con textura arcillosa

El Cuadro 5 presenta las características micromorfológicas que se utilizaron para describir el suelo con textura arcillosa con diferentes dosis de mucílago de nopal para el primer muestreo. Mientras, que la Figura 16 muestra las fotografías de las láminas delgadas tomadas en el primer muestreo (a los 7 días). La comparación se realizó con respecto al testigo.

**Cuadro 5. Características micromorfológicas del suelo arcilloso y arenoso con diferentes dosis de mucílago de nopal.**

CARACTERÍSTICA		Suelo arcilloso	Suelo arenoso
Componentes básicos		Minerales finos	Granos de arena
Componentes minerales		Partículas de arcilla	Minerales gruesos
Masa basal		Material fino	Material grueso
Color de la masa		Pardo a pardo oscuro	Incolora o cristalina
Huecos		Planares o empaquetamiento	Empaquetamiento simple
Agregación	Tipo	Migajoso con agregado poroso de forma esferoidal	Sin desarrollo
	Grado de desarrollo	Moderado	
	Grado de acomodación	parcial	
Tipo de microestructura	Ni agregadas ni arenosas	masiva	Grano simple
	Agregadas	Migajoso bloques subangulares	

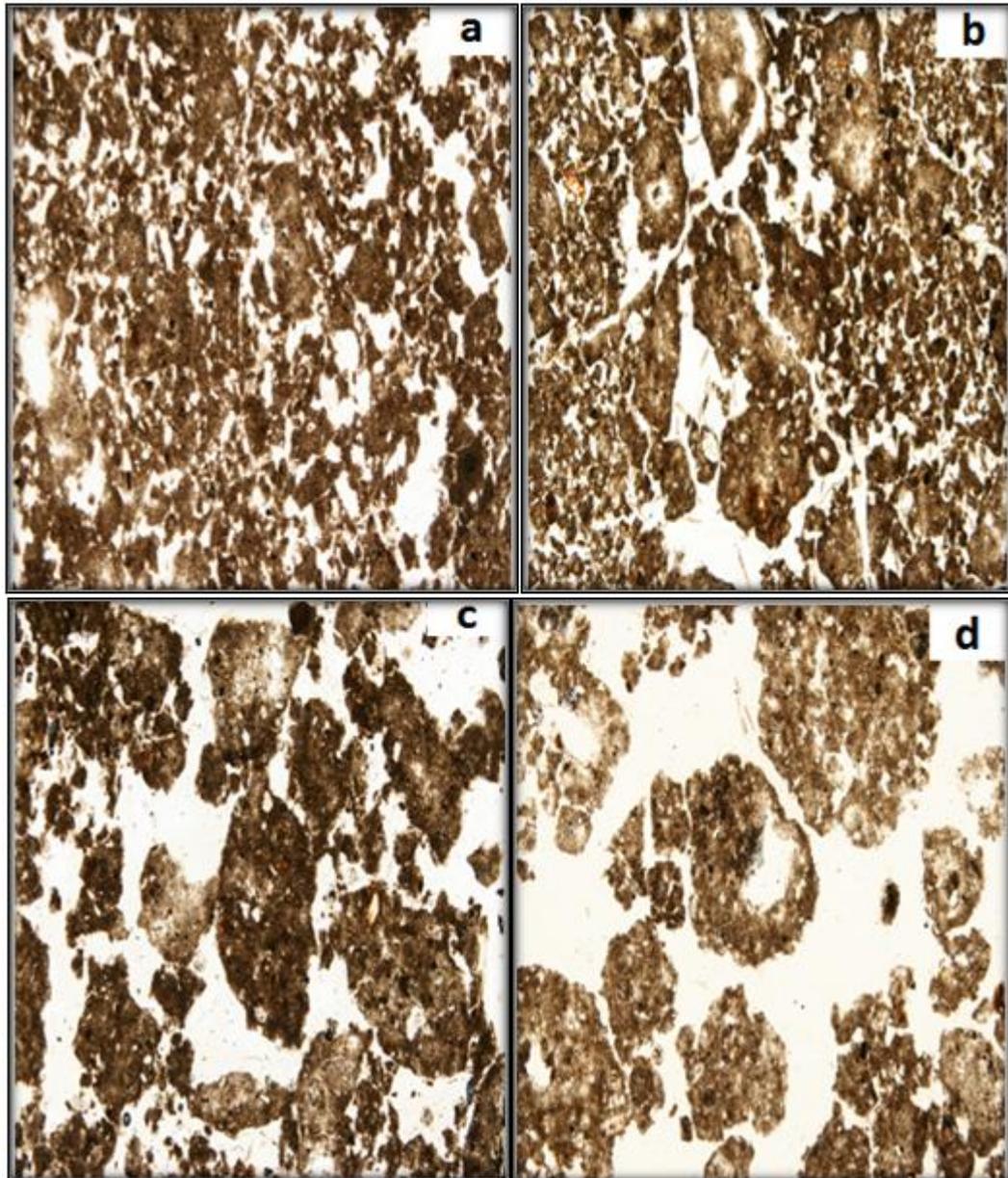


Figura 16. Láminas delgadas (4x) de suelo arcilloso, muestreo a los siete días después de la aplicación del mucílago de nopal. Tratamientos: a) testigo, b) tratamiento 10-90, c) tratamiento 40-60 y d) tratamiento 80-20. La primera cantidad corresponde mucílago de nopal (%) y la segunda a la del agua (%).

#### 6.5.1.1.1. Componentes básicos

Sus componentes básicos fueron arcillas. Estas forman la base del suelo y se encuentran organizadas en edaforrasgos y agrupadas en componentes minerales finos.

#### **6.5.1.1.2. La masa basal**

Es un término general que se usa para el material fino que forma la base material del suelo. La descripción de la masa basal incluye los siguientes conceptos: color de la masa basal, huecos, agregación, microestructura y contextura birrefringente del material fino (micromasa).

Aunque existen muchos estudios de los minerales de arcilla en la formación de agregados y es reconocida su importancia. El tipo de arcilla, es decir, la formación de agregados y su dinámica han sido poco estudiadas. Deneff y Six (2002, 2004, 2005) y Six *et al.* (2000) observaron que la estabilidad de los agregados en suelos dominados por arcillas 2:1, depende más de las moléculas orgánicas que del tipo de suelo, dominados por arcillas 1:1. Estos autores propusieron que las moléculas orgánicas son necesarias para cementar las partículas de arcilla 2:1 cargadas negativamente, mientras que la Interacción electrostática entre partículas de caolinita y óxidos de hierro puede ocurrir sin un agente de cementación. Sin embargo, ellos sólo estudiaron dos suelos, uno dominado por arcilla caolinita y el otro dominado por illita. Por lo tanto, es difícil generalizar sus resultados.

#### **6.5.1.1.3. Color de la masa basal**

El color de la masa basal del suelo fue de color Pardo a pardo muy oscuro, debido generalmente al contenido de la materia orgánica.

#### **6.5.1.1.4. Los huecos**

Los hay de muy diversos tipos, en el suelo arcilloso se presentaron los siguientes: primero; los huecos de empaquetamiento compuesto, que son equidimensionales a elongados, interconectados, se presentan entre agregados y las caras de éstos no están acomodada y son el resultado del empaquetamiento de los agregados. Los segundos, constituidos por los huecos planares, formados por grietas, frecuentemente por disecación del suelo.

Los suelos presentan huecos y conexiones llamados poros así como grietas. Entre los poros se encuentran las partes sólidas, o al menos las partes con microporosidad. La razón de la presencia de una estructura macroporosa de los suelos es que la mayoría de las plantas no pueden vivir en un ambiente saturado de agua. El aire es una necesidad para las raíces y crecimiento de las plantas. La mayoría de éstas, no pueden sobrevivir en un ambiente carente de oxígeno. Algunas lo hacen, pero están especializadas. Una de las razones de esto, es la necesidad de tener una fuente de aire para la extracción de nitrógeno. La mayor parte del intercambio de nitrógeno entre el aire y las plantas se produce en la zona del suelo. Así, los suelos tienen poros, es decir, pasajes en los que el aire está presente. Como resultado, estos poros son también un vehículo para el flujo de agua, tanto de entrada como de salida para que permita la entrada del aire al sistema. Los poros son entonces vitales para la existencia de la mayoría de las plantas.

Para el crecimiento saludable de las plantas, un suelo debe poseer agregados con poros mayores de 75  $\mu\text{m}$  para mantener buenas condiciones aeróbicas además, tener un número suficiente de poros entre 30-0.2  $\mu\text{m}$  de diámetro para retener el agua por capilaridad y poros grandes entre los agregados para permitir una rápida infiltración y drenaje (Tisdall y Oades, 1982). Esta estructura ideal, proporcionaría agua disponible para las plantas y un entorno adecuado para microorganismos cuya actividad es crucial para el ciclo de los nutrientes y que se encuentran viviendo en la superficie de los poros.

#### **6.5.1.1.5. La agregación**

La estructura del suelo está estrechamente relacionada con la asociación íntima de la materia orgánica y arcillas. Los materiales orgánicos tienden a unir las partículas de arcilla y formar agregados de las partículas. El tamaño y la estabilidad de estos agregados son vitales para la existencia de las plantas en los suelos. Por lo tanto, es importante entender los mecanismos subyacentes del desarrollo y la estabilidad de la estructura del suelo, y los medios por los cuales los agregados del suelo se forman. Además, entender que la agregación está relacionada con la actividad biológica, lo que provoca la modificación de estructura en la rizósfera.

En numerosos estudios se han hecho observaciones sobre los efectos de diferentes moléculas orgánicas en la formación de agregados. Es evidente que los exudados de raíces son muy importante en esta acción (Troare *et al.*, 2000). También, otros productos secundarios de la acción bacteriana puede ser importante, así como el material residual húmico (Dinel *et al.*, 1991; Cornejo y Hermosín, 1996). Gran parte de la interacciones parecen ocurrir en los bordes de los cristales (Varadachari *et al.*, 1995) pero la interacción de materiales orgánicos y arcillas pueden ser observadas en las superficies de las arcilla y estos complejos órgano-minerales están unidos el uno al otro por materiales más ligeros, tales como moléculas de polisacáridos (Chenu, 1993). A pesar de la complejidad de los sistemas de observación, éstos permiten comprender los fundamentos del proceso.

#### **6.5.1.1.5.1. Por el tipo de agregado**

Se puede observar en las fotos de las láminas delgadas del experimento con suelo arcilloso, que corresponde a un migajoso con agregados porosos, de forma más o menos esferoidal.

#### **6.5.1.1.5.2. En función de su grado de desarrollo**

Está determinada según con la intensidad que se manifiestan los agregados. Para el suelo arcilloso, corresponde a agregados moderadamente desarrollados.

#### **6.5.1.1.5.3. En función de su grado de acomodación**

Se definen según el grado con que las caras adyacentes se amoldan unas a otras. En éste caso, corresponde a la agregación parcialmente acomodada.

De acuerdo con los modelos de la estructura del suelo, la materia orgánica actúa como un agente de cementación entre las partículas minerales (Tisdall y Oades, 1982). Entre las moléculas orgánicas, los polisacáridos se han descrito como agentes de unión muy eficientes. Esto se ha ilustrado previamente para los polisacáridos neutros y polisacáridos cargados negativamente en presencia de iones polivalentes. En los estudios de varios autores, se intentaron determinar si sí o no los polisacáridos

también incrementaban la estabilidad de los agregados. Chenu y Guérif (1991) mostraron que el escleroglucano (un polisacárido de los hongos) aumentó las fuerzas de resistencia a la tensión de las muestras de arcilla pura. Czarnes *et al.* (2000) observó la misma tendencia con el ácido poligalacturónico, APG (un análogo de mucílago de raíz) en un suelo natural.

#### **6.5.1.1.6. Tipos de microestructuras**

Es la estructura que muestra el suelo bajo el microscopio. Está relacionada con el tamaño, forma y disposición de las partículas primarias y los huecos en materiales agregados y no agregados y el tamaño, forma y disposición de cualquier agregado presente.

##### **6.5.1.1.6.1. Microestructuras ni agregadas ni arenosas**

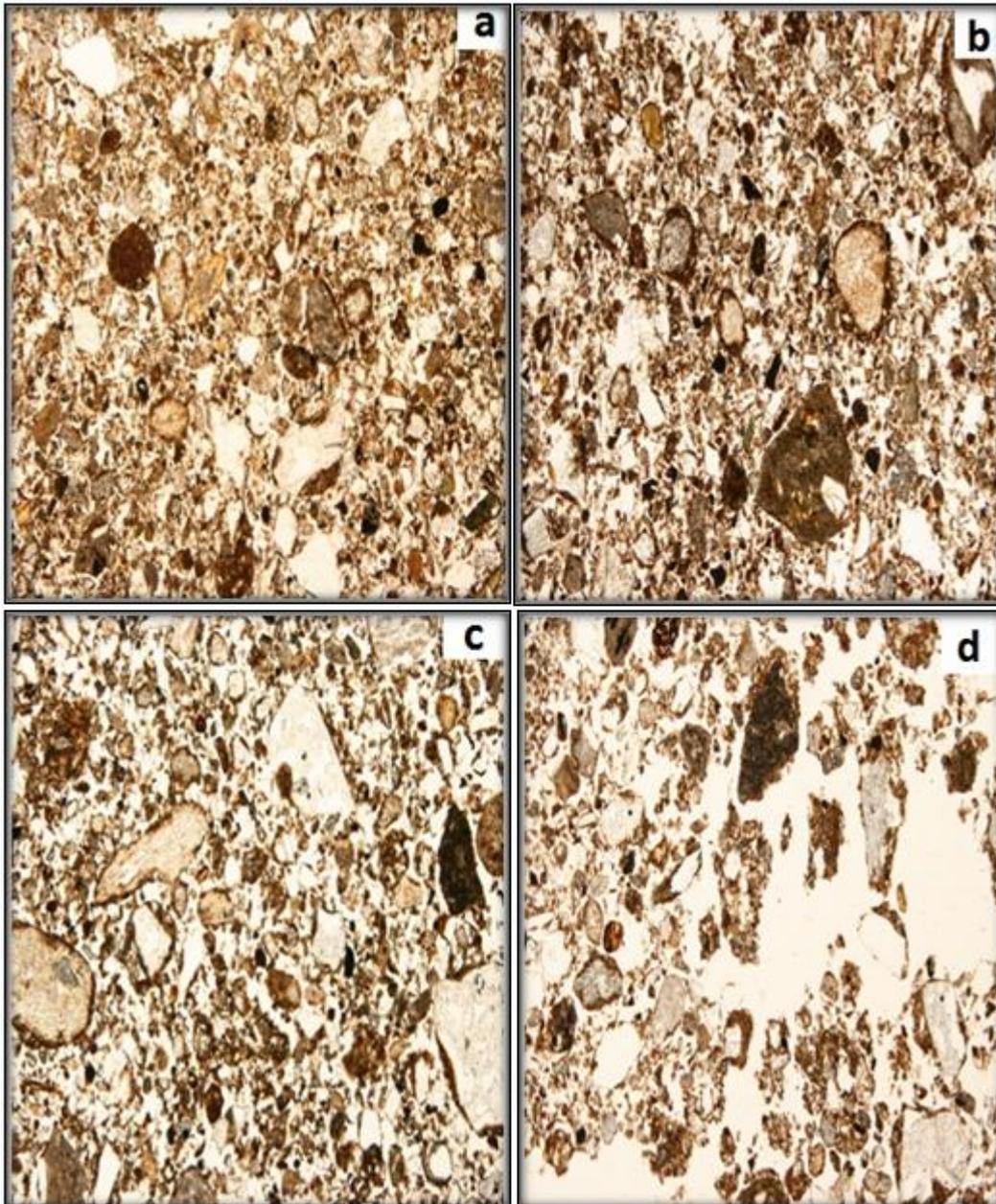
Dentro de ésta encontramos la masiva, que se distingue por estar formada sin agregados separados, material muy denso, sin poros. Parecida a la microestructura presente en el suelo arcilloso en el tratamiento testigo.

##### **6.5.1.1.6.2. Microestructuras agregadas**

Los tratamientos con las diferentes dosis de mucílago podrían estar constituidos por microestructuras agregadas en migajosa o en bloques subangulares.

#### **6.5.1.2. Suelo con textura arenosa**

La descripción micromorfológica para el suelo de textura arenosa se presentan en el Cuadro 5 y Figura 17 para el primer muestreo, con la descripción siguiente:



**Figura 17. Láminas delgadas (4x) de suelo arenoso, realizado a los siete días después de la aplicación del mucílago de nopal para cada uno de los tratamientos: a) testigo, b) tratamiento 10-90, c) tratamiento 40-60 y d) tratamiento 80-20. La primera cantidad corresponde mucílago de nopal (%) y la segunda a la del agua (%).**

#### **6.5.1.2.1. Componentes básicos**

Son las unidades de contextura más simples existentes en el suelo. En el muestreo uno, corresponde a granos de arena, de origen mineral. Los granos de arena son componentes minerales gruesos, ya que generalmente son identificables al microscopio petrográfico, presentándose como granos individuales. Los componentes

básicos del suelo se clasifican componentes minerales finos y componentes minerales gruesos. Las arenas pertenecen a éste último grupo, en el que se encuentra el cuarzo, que visto en al microscopio petrográfico y solo con el polarizador, se presenta incoloro o cristalino, tal es el caso en los diferentes tratamientos a base de mucílago en el suelo arenoso.

#### **6.5.1.2.2. Masa basal**

Término general que se usa para el material grueso y fino que forma la base material del suelo y que no forma parte de los edaforrasgos, para nuestro caso, corresponde a material grueso. La descripción de la masa basal incluye los siguientes conceptos: huecos, agregación, microestructura, contextura birrefringente del material fino (micromasa).

#### **6.5.1.2.3. Huecos**

En láminas delgadas aparecen incoloros con sólo el polarizador y al colocar el analizador se ven negros. Los hay de muy diversos tipos, pero para el caso del experimento en suelo arenoso, se les conoce como huecos de empaquetamiento simple, que presentan las siguientes características: son Equidimensionales a elongados, interconectados presentándose entre los granos del esqueleto. Son el resultado de un simple empaquetamiento.

#### **6.5.1.2.4. Agregación**

Los constituyentes elementales del suelo, arenas, limos, arcillas y materiales orgánicos, etc., no se presentan aislados sino que se encuentran unidos entre sí formando agregaciones. Estos agregados pueden ser analizados de manera exhaustiva en el microscopio petrográfico o sea a nivel micromorfológico, aunque también se pueden describir directamente en el perfil del suelo. Son observables a nivel macromorfológico, directamente en el perfil del suelo en el campo. La agregación en base a su grado de desarrollo, se manifiesta según la intensidad en que se manifiestan los agregados, para el suelo arenoso se considera como débilmente desarrollada, como es el caso del tratamiento 80-20 en el primer muestreo en suelo arenoso (a los 7 días).

#### **6.5.1.2.5. Tipos de microestructuras**

Son las estructuras que muestra el suelo bajo el microscopio. Están relacionadas con el tamaño, forma y disposición de las partículas primarias y los huecos en materiales agregados y no agregados y el tamaño, forma y disposición de cualquier agregado presente.

El suelo arenoso presenta una microestructura de grano de arena y dentro de esta una estructura de grano simple; constituida por granos de arena con o sin material fino entre los granos, granos sueltos o tocándose parcialmente. Aunque, también el suelo arenoso puede presentar la estructura de grano puenteado, en la cual, los granos de arena están unidos por puentes de material fino. La información anterior, se resume en el siguiente en el Cuadro 6.

El tratamiento uno formado por un suelo arenoso y con diferentes dosis de mucílago; su desarrollo estructural se considera débil o pobre, tal como mencionó Lars y Schjønning (2004), que la capa superficial de un suelo franco arenoso muestra baja estabilidad estructural cuando son expuestos a la compactación del suelo y rotación intensiva de cultivo en condiciones húmedas. Además, La capa superficial del suelo mostró muy poca recuperación estructural.

Otro de los factores a considerar es su composición mineralógica. Como el estudio realizado por De León (2007) en la región volcánica del centro de México se pueden encontrar suelos dominados por partículas de arena los cuales se erosionan fácilmente por la acción del viento y la lluvia. Tal es el caso de la región sur del Valle de México en cuya zona montañosa se localizan suelos con alto contenido de partículas de arena. El suelo es un migajón arenoso con 79% de arena, 14% de limo y 7% de arcilla, con bajo grado de alteración y 1.5% de carbono orgánico.

Los agregados son las estructuras básicas que sustentan la conservación de los suelos. Las propiedades de expansión-contracción de las arcillas facilitan el proceso de agregación. Pero al estar ausentes, el suelo se desagrega y se pulveriza.

## 6.5.2. Descripción de láminas delgadas para el segundo muestreo en suelos arcilloso y arenoso con diferentes dosis de mucílago de nopal

### 6.5.2.1. Suelo de textura arcillosa

La Figura 18 muestra las fotografías (a, b, c y d) de las láminas delgadas en el segundo muestreo en el suelo de textura arcillosa con diferentes tratamientos.

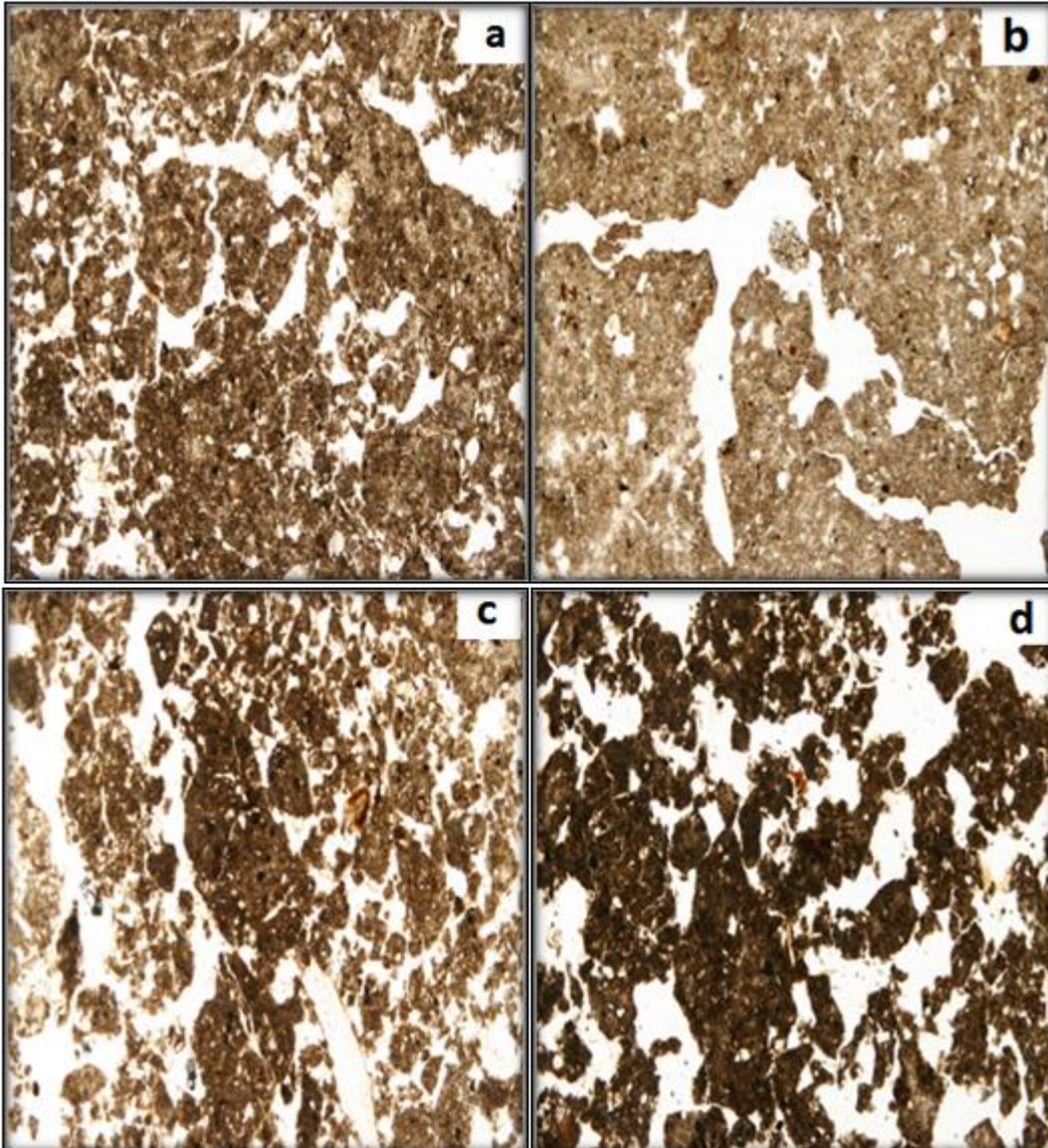


Figura 18. Láminas delgadas (4x) para suelo arcilloso a los 14 días después de la aplicación del mucílago de nopal para cada uno de los tratamientos: a) testigo, b) tratamiento 10-90, c) tratamiento 40-60 y d) tratamiento 80-20. La primera cantidad corresponde mucílago de nopal (%) y la segunda a la del agua (%).

Los resultados obtenidos apoyan la hipótesis inicial de la agregación, de que un aumento en la cantidad de mucílago podría incrementar la estructuración del suelo, como resultado de lo anterior, se observó una mayor agregación en los tratamientos con mayor cantidad de mucílago.

Asimismo, los mayores contenidos de arcilla y limo y menor contenido de arena, juegan un papel importante, tal y como lo mencionan los trabajos de acuerdo de Schimel *et al.* (1994) y Oades (1988), en que los suelos con altos contenidos de arcilla y limo tienen un efecto significativo en la acumulación de carbono orgánico por presentar, tanto mecanismos físicos como químicos en la protección del carbono orgánico a la descomposición por los microorganismos del suelo.

La aplicación de mucílago de nopal al suelo mejoró la estructura. Dicho material puede aumentar la macroagregación y la estabilidad de los agregados. Aunque los efectos de la aplicación del mucílago de nopal sobre la estructura puede ser de breve duración; estos efectos son generalmente positivos sobre las propiedades estructurales (Debosz *et al.* 2002). Se espera encontrar una mejor estructura del suelo, en suelos bajo manejo orgánico que en suelos con manejos convencionales, porque la complejidad de los fertilizantes y otras enmiendas sobre las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, producen efectos variables sobre la agregación del suelo.

Otros trabajos, que han remarcado la importancia de la textura por afectar las cantidades de COS y la retención de la materia orgánica en el suelo, se encuentran los siguientes: Correlaciones lineares fueron encontradas entre la textura del suelo y el COS por Spain (1990) y Hassink (1994). Las diferencias en las velocidades de descomposición y cantidades de COS en varios suelos texturizados han sido atribuidas a diferencias en la protección física del COS, por ejemplo: residuos de cultivos adicionados al suelo se descomponen más rápidamente en suelos arenosos que en suelos arcillosos, por lo tanto, en estos últimos, la protección es mayor (Sorensen, 1981; Ladd, *et al.*, 1985). Jenkinson (1988) encontró que con el mismo ingreso de materiales orgánicos, los suelos arcillosos tienden a contener más materia orgánica

que suelos arenosos. Liang *et al.* (1998) reportaron que la textura del suelo controla directamente la proporción de carbono de los residuos de cosechas contenido en los suelos. La agregación y textura determinan indirectamente el nivel de carbono retenido en el suelo por suprimir la actividad biológica (Hassink, 1996). El efecto de la estabilización ha sido atribuida a la adsorción de compuestos orgánicos sobre las superficies, tales como las partículas de arcillas (Oades, 1988) y encapsulación entre partículas de arcillas (Tisdall y Oades, 1982; Elliott y Coleman, 1988).

Además, La textura puede afectar el retorno de la materia orgánica debido a la adsorción de la materia orgánica sobre las superficies de las arcillas o complejos orgánicos (Oades, 1988). La textura también presenta influencias sobre la estructura (Schjønning *et al.*, 1999) debido a las modificaciones de las condiciones ambientales, en las cuales las condiciones de descomposición tienen lugar (distribución del tamaño de poro, intercambio gaseoso, movilidad de células y difusión de sustratos; Sommers *et al.*, 1981).

Asimismo, una alta correlación ( $r^2=0.71$ ) existe para los contenidos de arcilla versus las concentraciones de carbono orgánico. Específicamente, como los contenidos de arcillas se incrementaron, se presentó un incremento lineal en la concentración del carbono orgánico. Como era de esperarse, esta tendencia es similar a la descrita por Nichols (1984).

### 6.5.2.2. Suelo de textura arenosa

La figura 19 muestra las fotografías del suelo arenoso al que se le aplicaron diferentes dosis de nopal, cuya explicación se menciona enseguida:

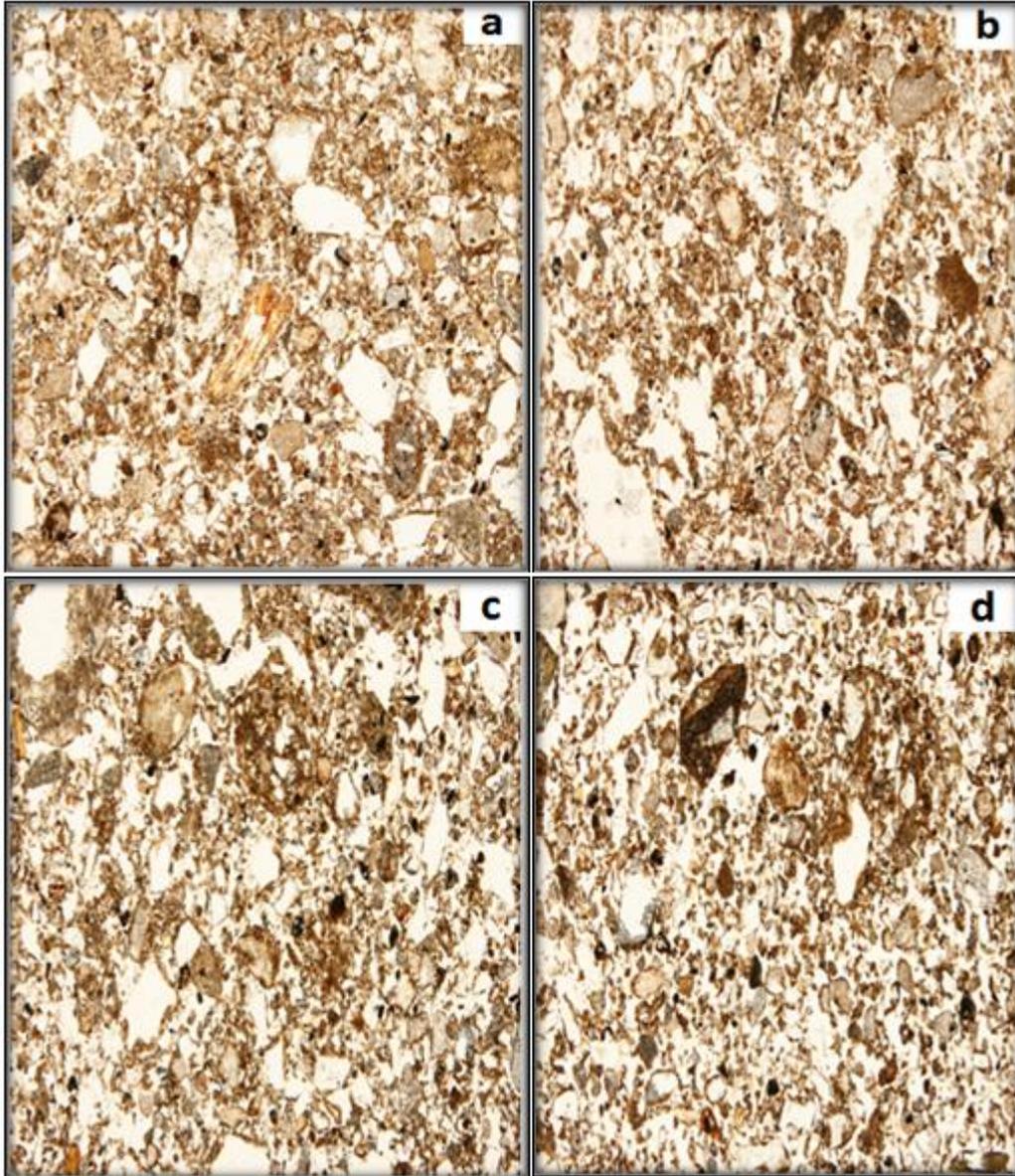


Figura 19. Láminas delgadas (4x) para suelo arenoso, muestreo dos a los 14 días después de la aplicación del mucílago de nopal para cada uno de los tratamientos: a) testigo, b) tratamiento 10-90, c) tratamiento 40-60 y d) tratamiento 80-20. La primera cantidad corresponde mucílago de nopal (%) y la segunda a la del agua (%).

La aplicación de mucílago no tuvo efecto sobre la agregación, debido a la textura arenosa de este suelo, tal y como era de esperarse, que suelos con altos contenidos de arena no permitan la cohesión de las partículas, limitando la agregación. Porque los suelos necesitan aproximadamente 15% de arcilla para formar agregados (Horn *et al.*, 1994).

Los suelos que presentan altos contenidos de arena presentan una fuerte correlación negativa ( $r^2=0.71$ ) respecto a las concentraciones de carbono; una relación lineal mostró disminución en la concentración de carbono orgánico del suelo con un incremento en los contenidos de arcilla. Los suelos con altos contenidos de arena drenan mejor que suelos de textura fina (Konen, 1999), como resultado uno podría esperar una disminución en la acumulación de carbono orgánico con un incremento en los contenidos de arena.

Suelos con alto contenido de arena, suelen presentar velocidades más altas de mineralización y niveles más bajos de carbono orgánico (García, 2007), debido a que los mecanismos de protección son reducidos o se encuentran ausentes. Aparte de la protección física del carbono orgánico del suelo (COS) que se da a través de la agregación la cual reduce la accesibilidad de los compuestos orgánicos a los microorganismos y enzimas, también existen, la protección química, dada por la formación de complejos órgano-mineral y la protección bioquímica a través de moléculas orgánicas químicamente recalcitrantes (Sollins *et al.*, 1996; Jastrow y Miller, 1998) y que es referida como un pool pasivo (Parton *et al.*, 1987).

### 6.5.3. Descripción de láminas delgadas para el tercer muestreo en suelos con textura arcillosa y arenosa con diferentes dosis de mucílago de nopal

#### 6.5.3.1. Suelo de textura arcillosa

La Figura 20 muestra las fotografías (a, b, c y d) de las láminas delgadas en el tercer muestreo con diferentes tratamientos a base de mucílago de nopal.

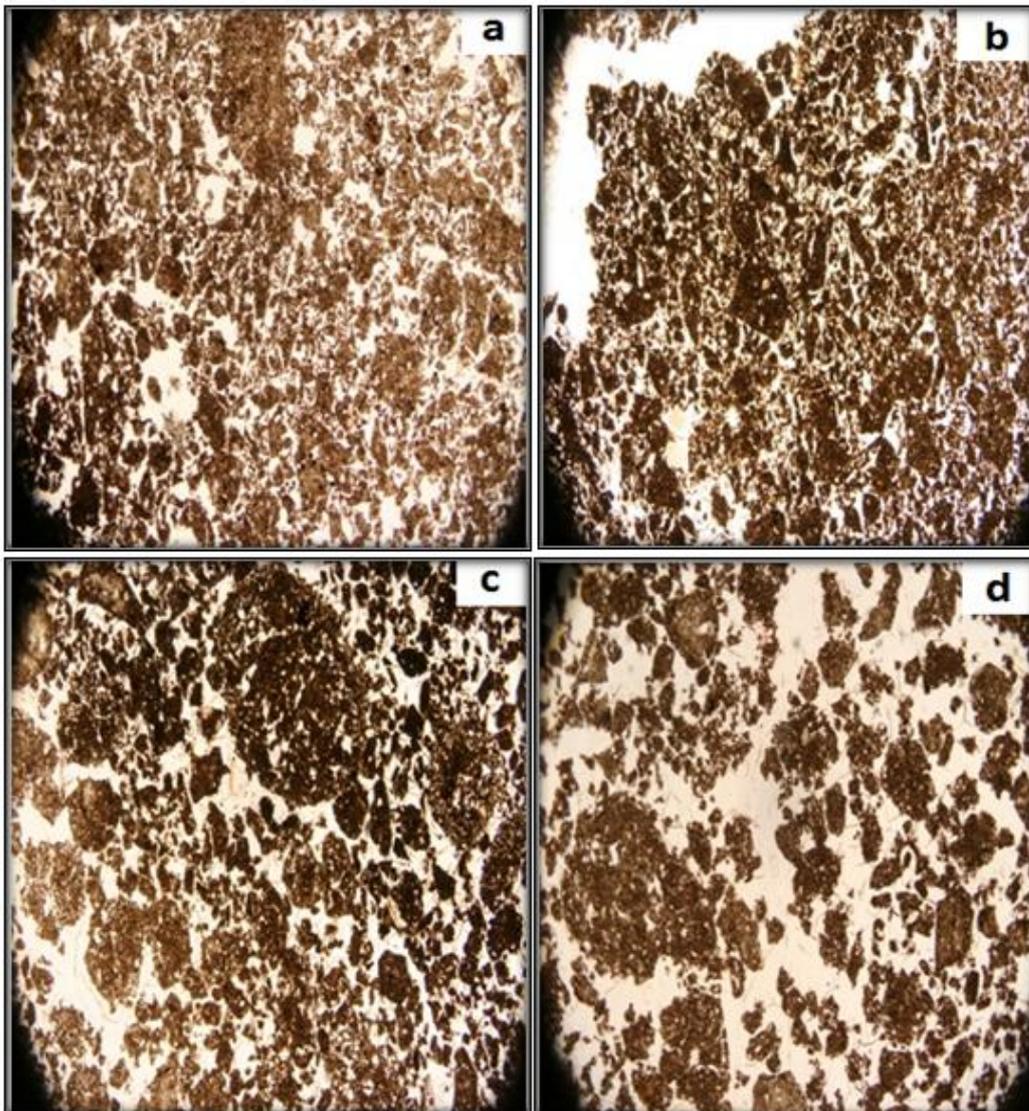


Figura 20. Láminas delgadas (4x) de suelo arcilloso, a los 21 días después de la aplicación del mucílago de nopal para cada uno de los tratamientos: a) testigo, b) tratamiento 10-90, c) tratamiento 40-60 y d) tratamiento 80-20. La primera cantidad corresponde mucílago de nopal (%) y la segunda a la del agua (%).

En la Figura 20, las fotografías b y c muestran un colapso de la estructura que ya se había ganado en el muestreo dos, mientras que en la fotografía d todavía se mantiene la agregación. Lo anterior hace pensar que el mucílago de nopal es de duración temporal.

Las imágenes de láminas delgadas sugieren un cambio en el arreglo estructural después de la aplicación del mucílago de nopal. En la Figura 20 (b, c, d) se observa la estructura del suelo con relación a su aspecto inicial Figura 20 (a). En éstas, se observa que el arreglo estructural del testigo permanece sin cambio, En el suelo testigo se apreció una estructura masiva, característica común de los suelos arcillosos compactados. Las imágenes que se muestran en la Figura 7 (b, c, d) corresponden a los tratamientos de 10, 40 y 80% de mucílago de nopal, respectivamente.

El color en los suelos tratados fue más oscuro que en el testigo (Figura 20 b, c, d). Este cambio de color puede deberse al incremento en las dosis de mucílagos de nopal que fueron empleadas. Aunado a lo anterior, el arreglo estructural cambió en los suelos tratados, ya que el agrietamiento disminuyó gradualmente conforme se incrementó la dosis y una mayor proporción de agregados menores se hicieron presentes, particularmente en el suelo tratado con 80% de mucílago de nopal (Figura 20 d).

Los resultados de este estudio ponen de manifiesto que los efectos del aporte de mucílago sobre las propiedades físicas de suelos arcillosos como los vertisoles, son perceptibles en periodos de tiempo relativamente cortos.

Los suelos vertisoles tienen como principal restricción productiva, la baja agregación y drenaje deficiente (Palma-López y Cisneros, 2000). Según Bresson et al. (2001) este problema puede ser atendido mediante aportes de enmiendas orgánicas como el compost, ya que las enmiendas ayudan a regenerar las estructuras perturbadas a causa de las prácticas agrícolas y la pérdida de la materia orgánica del suelo (MOS). Mikha y Rice (2004) identificaron diferentes fracciones en la MOS

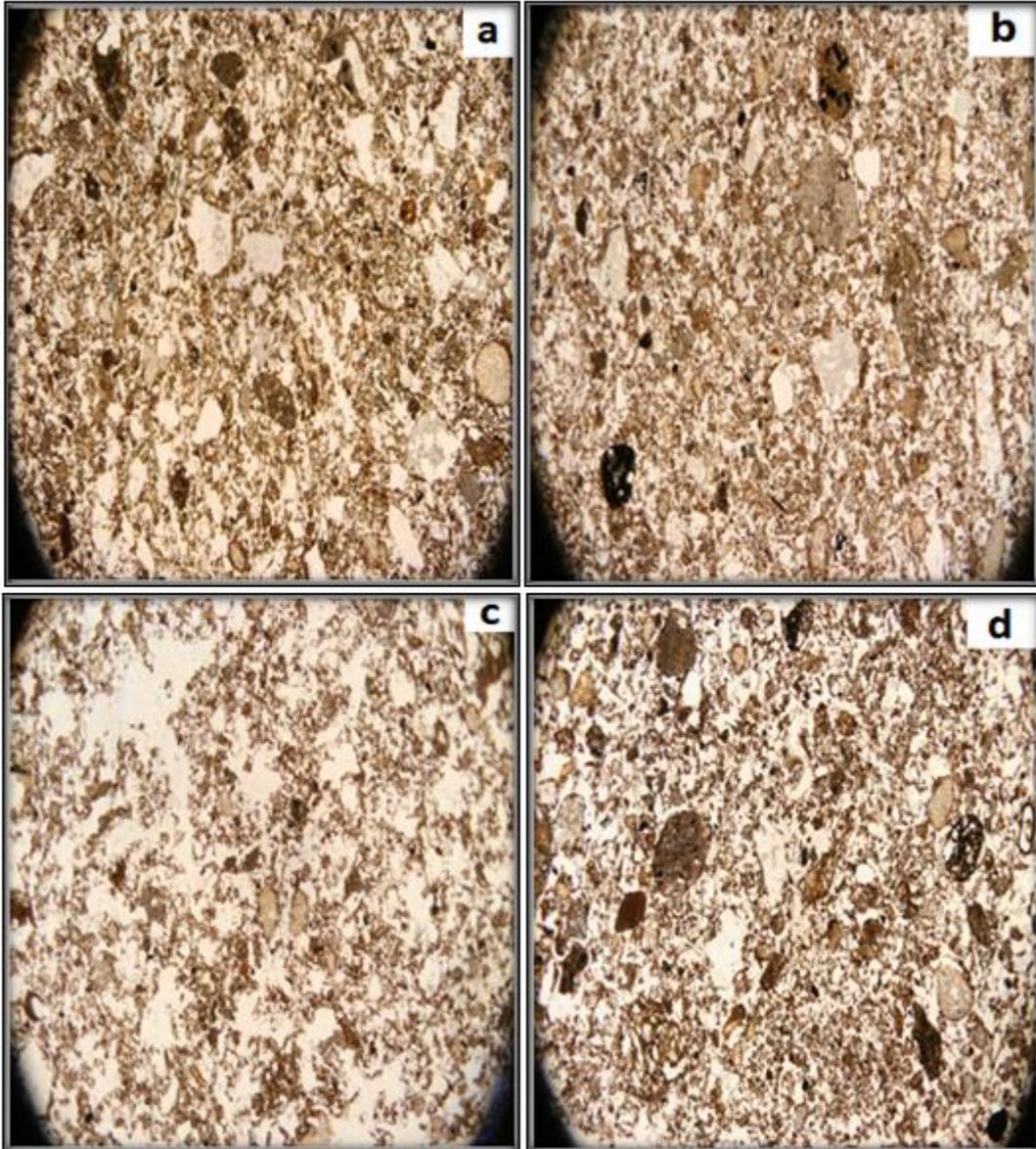
consideradas como agentes activos que favorecen la agregación a través de mecanismos físicos y químicos.

Las propuestas para explicar la formación de agregados han sido varias. Tisdall y Oades (1982) sugirieron que los agregados son formados mediante el enlace de partículas minerales, que se unen para formar los microagregados (50-250  $\mu\text{m}$ ), a partir de la unión de esos microagregados se forman los macroagregados (> 250  $\mu\text{m}$ ). Posteriormente, Oades (1984) señaló que primero los macroagregados (250-2000  $\mu\text{m}$ ) se forman alrededor de MO fresca. Si los macroagregados no son perturbados por la labranza o factores ambientales, entonces esos residuos se descomponen y se fragmentan en materia orgánica más fina, la cual gradualmente empieza a incrustarse con partículas de arcillas y productos microbianos, formando microagregados dentro de los macroagregados. Cuando los macroagregados se desestabilizan debido a la degradación de los agentes enlazantes, los microagregados estables empiezan a liberarse, esos microagregados constituyen los bloques necesarios, para la formación de nuevos macroagregados.

Puget *et al.* (2000) respaldaron este modelo al mostrar que los agregados estables fueron enriquecidos con incorporaciones recientes de MO. Posteriormente Bossuyt *et al.* (2004) señalaron que la macroagregación es resultado de un enriquecimiento con materia orgánica fresca, la cual constituye un núcleo alrededor del cual, se adhieren las partículas minerales, posteriormente, la alteración de los macroagregados da como resultado, la aparición de microagregados estables.

### 6.5.3.2. Suelo de textura arenosa

La Figura 21 muestra las fotografías (a, b, c y d) de las láminas delgadas en el tercer muestreo con diferentes tratamientos a base de mucílago de nopal.



**Figura 21. Láminas delgadas (4x) de suelo arenoso, a los 21 días después de la aplicación del mucílago de nopal para cada uno de los tratamientos: a) testigo, b) tratamiento 10-90, c) tratamiento 40-60 y d) tratamiento 80-20. La primera cantidad corresponde mucílago de nopal (%) y la segunda a la del agua (%).**

Las fotografías de láminas delgadas de la Figura 21, el testigo (Figura 21 a) presenta características similares a las fotografías de la Figura 21 (b y d), lo cual sugiere que no se presentaron cambios estructurales en este suelo arenoso en el tercer muestreo. La excepción la presenta la Figura 21 (c), en la cual se puede observar un pequeño arreglo estructural, siendo necesario un estudio más escrupuloso para saber si realmente existe un mejoramiento en los suelos arenosos.

La baja o nula estructuración de los suelos arenosos se debe a las características de su composición mineralógica y de las propiedades de sus partículas, tal y como lo menciona Porta *et al.* (2003), que la arena se caracteriza por la proporción relativa del contenido de partículas gruesas en los suelos, la cual tiene un tamaño entre 50- 2000  $\mu\text{m}$ . En términos generales, los suelos se dividen en suelos de texturas finas, cuando predominan las arcillas y de texturas gruesas, cuando dominan las arenas. Los suelos arenosos tienen poros grandes, permiten una rápida infiltración del agua, mayor circulación del aire; además, dominan minerales como el vidrio volcánico, cuarzo y feldespatos potásicos; estos minerales son de colores claros por lo tanto, reflejan más luz.

Los suelos arenosos son inertes desde el punto de vista químico, carecen de propiedades coloidales y de reservas de nutrientes. En cuanto a las propiedades físicas presentan mala estructuración, buena aireación, muy alta permeabilidad y nula retención de agua.

Además, Hassink *et al.* (1997) menciona que se ha encontrado que en suelos arenosos, los contenidos de carbono orgánico son menores que en los suelos arcillosos, debido a que en éstos últimos la protección física es predominantemente sobre la degradación de los materiales orgánicos.

Hassink (1993b) también estableció el mecanismo dominante de la protección física de la materia orgánica en los suelos de texturas finas y gruesas; en los suelos arcillosos la protección de los materiales orgánicos se debe a su localización en poros pequeños, mientras que en suelos arenosos la protección puede estar asociada con las partículas de arcillas libres, ocasionando una mayor superficie expuesta.

Por el contrario, los suelos arcillosos son muy activos desde el punto de vista químico, adsorben iones y moléculas, flocculan (la fracción arcilla permanece inmóvil) y se dispersan (migran), son muy ricos en nutrientes, retienen mucha agua, están bien estructurados, pero son impermeables y asfixiantes.

## **6.6. CONCLUSIONES**

Los efectos del aporte de mucílago de nopal sobre las propiedades físicas de suelos arcillosos como los vertisoles, son perceptibles en periodos de tiempo relativamente cortos.

Con relación al testigo, las imágenes para el suelo con textura arcillosa sugieren un cambio en el arreglo estructural en los tratamientos a los que se les aplicó mucílago de nopal, en 10, 40 y 80% en los tres muestreos analizados. Además, en éstas se observa que el arreglo estructural del testigo permanece sin cambio, En el suelo testigo (sin mucílago) se observó una estructura masiva, característica común de los suelos arcillosos compactados. El arreglo estructural cambió en los suelos tratados, ya que el agrietamiento disminuyó gradualmente conforme se incrementó la dosis de mucílago y una mayor proporción de agregados menores se hicieron presentes, particularmente en el suelo tratado con 80% de mucílago de nopal.

La aplicación de mucílago no tuvo efecto sobre la agregación en el suelo con textura arenosa, ya que los suelos con altos contenidos de arena no permiten la cohesión de las partículas, limitando la agregación.

## 6.7. BIBLIOGRAFÍA

- Barré, P. and Hallett P. 2009.** Rheological stabilization of wet soils by model root and fungal exudates depends on clay mineralogy. *European Journal Soil Science* 60: 525-538.
- Bossuyt, H., Six, J. Hendrix, P. F. 2004.** Rapid incorporation of carbon from fresh residues into newly formed stable microaggregates within earthworm casts. *European Journal Soil Science*. 55 (2): 393-401.
- Bullock, P., N. Federoff, A. Jongerius, G. Stoops, and T. Tursina. 1985.** Handbook for soil thin section description. Wayne Research Publications, England.
- Bresson, L. M., Coch, C., Le Bissonais, Y. Barruso, E. Lecomte, V. 2001.** Soil surface structure by municipal waste compost application. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65: 1804-1811.
- Carter, M.R. 2004.** Researching structural complexity in agricultural soils. *Soil and Tillage Research*.
- Chenu, C. 1993.** Clay – or sand-polysaccharide associations as models for the interface between micro-organisms and soil: Water related properties and microstructure. *Geoderma* 56: 143–156.
- Chenu, C. and Guérif, J. 1991.** Mechanical strength of clay minerals as influenced by an adsorbed polysaccharide. *Soil Sci Soc Ame J* 55: 1076–1080.
- Cornejo, J. and Hermosin, M. C. 1996.** Interaction of humic substances and soil clays, pp. 509–625. In A Piccolo (ed.), *Humic Substances in Terrestrial Ecosystems*, Elsevier, 753 pp.
- Czarnes, S., Hallett, P. D., Bengough, A. G. and Young, I. M. 2000.** Root- and microbial-derived mucilages affect soil structure and water transport. *European Journal Soil Science* 51: 435–443.
- De León, G. F., Gutiérrez C. C., González, C. M. C. 2007.** *Geoderma* (2007). 308- 317.
- Debosz, K., Petersen, S.O., Kure, L.K., Ambus, P. 2002.** Evaluating effects of sewage sludge and household compost on soil physical, chemical and microbiological properties. *Appl. Soil Ecol.* 19: 237-248.
- Denef, K. and Six, J. 2005.** Clay mineralogy determines the importance of biological versus abiotic processes for macroaggregate formation and stabilization. *European Journal Soil Science* 56: 469–479.
- Denef, K., Six, J. and Merckx, R. 2004.** Carbon sequestration in microaggregates of no-tillage soils with different clay mineralogy. *Soil Soc Soc Ame J* 68: 1935–1944.

- Denef, K., Six, J. and Merckx. (2002)** Short-term effects of biological and physical forces on aggregate formation in soils with different clay mineralogy. *Plant Soil* 246: 185–200.
- Dinel, H., Mehuys, G. and Lévesque, M. 1991.** Influence of humic and fibric materials on the aggregation and aggregate stability of a lacustrine silty clay. *Soil Sci* 151: 146–158.
- Elliott, E. T. and D. C. Coleman.1988.** Let the soil work for us. In: Eijsackers, H., Quispel, A. (Eds). *Ecological Implication of Contemporary Agriculture. Proceedings of the 4<sup>th</sup> European Ecology Symposium, Wageningen, Munksgaard, Copenaghen*, pp. 23-32
- Fenton, T., Brown, T. J. and Mausbach, M. 1999.** Effects of long – term cropping on organic matter content of soils: Implications for soil quality, 89–123. In R Lal (ed.), *Soil Quality and Soil Erosion*, CRC Press, 329 pp.
- Hassink, J. 1994.** Effects of soil texture and grassland management on soil organic C and N and rates of C and N mineralization. *Soil Biol. Biochem.* 26: 1221-1231.
- Hassink, J. 1996.** Preservation of plant residues in soils differing in insaturated protective capacity. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 60: 487-491.
- Horn, R. H., Taubner, M. Wuttke, and I. Baumgart.1994.** Soil physical properties related to soil structure. *Soil Tillage Res.* 30: 187-216.
- Jastrow, J. D. and R. M. Miller. 1998.** Soil aggregate stabilization and carbon sequestration: Feedbacks through organo-mineral associations. In: *Processes in the Carbon Cycle*. R. Lal, J. Kimble, R. Follet y B. A. Stewart (Eds.). C.R.C. Press Boca Raton, FL. Pp 207-223.
- Jenkinson, D. S. 1988.** Soil organic matter in its dynamics. In: Wild, A. (Ed.). *Soil condition and plant growth*, 11<sup>th</sup> ed. Longman, New York. Pp: 564-604.
- Konen, M. E. 1999.** Human impacts on soils and geomorphic processes on the Des Moines Lobe. Iowa. Ph. D diss. Iowa State Univ., Ames.
- Lad, J. N., M. Amato, J. M. Oades. 1985.** Decomposition of plant material in Australian soils. III. Residual organic and microbial biomass C and N from isotope-labelled legume material and soil organic matter, decomposing under field condition. *Aust. J. Res.* 23: 603-611.
- Lars, J. and P. Schjønning. 2004.** Structural vulnerability of a sandy loam exposed to intensive tillage and traffic in wet conditions. *Soil & Tillage Research* 79: 79–85
- Li, D. and Velde, B. 2003.** Aggregation in some clay-rich agricultural soils as seen in 2D image analysis. *Geoderma* 118: 191–207.
- Mikha, M. M, Rice, C. W. 2004.** Tillage and manure effects on soil and aggregate-associated carbon and nitrogen. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68: 809-816.

- Miller, R.D., Johnson, D.D., 1964.** The effect of soil moisture tension on carbon dioxide evolution, nitrification, and nitrogen mineralization. *Soil Science Society of America Proceedings* 28, 644–647.
- Moreau, E., Velde, B. and Terribile, F. 1999.** Comparison of 2D and 3D images of fractures in a Vertisol. *Geoderma* 92: 55–72.
- Nichols, J. D. 1984.** Relation of organic carbon to soil properties and climate in the Southern Great Plains. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 48: 1382-1384.
- Oades, J. M. 1984.** Soil organic matter and structural stability: mechanisms and implication for management. *Plant and Soil* 76:319-337.
- Oades, J.M., 1988.** The retention of organic matter in soils. *Biogeochemistry* 5, 35–70.
- Palma-López JD, Cisneros D J (2000)** Plan de uso sustentable de los suelos de Tabasco. Vol. 1. Segunda edición. Fundación Produce Tabasco, A.C. Villahermosa. 115 pp.
- Parton, W. J., D. S. Schimel., C. V. Cole, and D. Ojima. 1987.** Analysis of factors controlling soil organic levels of grassland in the Great Plains. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58: 530-536.
- Perth, S., Horn, R., Beckman., F, Donath, T. F., Fischer, J. and Schmucker, A. 2008.** Three-dimensional quantification of intra-aggregate pore-space features using synchrotron-radiation-based microtomography. *Soil Sci Soc Ame J* 72: 879–907.
- Porta, C. J., M. López-Acevedo R. y C. Roquero, D. 2003.** Edafología. Para la Agricultura y el Medio ambiente. 3ª Edición. Ediciones Mundi-Prensa. México
- Puget, P., Chenu, C. Balensdent, J. 2000.** Dynamics of soil organic matter associated with particle-size fractions of water-stable aggregates. *Europ. J. Soil Sci.* 51 (4): 595-601.
- Schimel, D. S., B. H. Braswell, E. A. Holland, R. McKeoun, D. S. Ojima, T. H. Painter, W. J. Parton, and A. R. Townsend. 1994.** Climatic, edaphic, and biotic controls over storage and turnover of carbon in soils. *Global Biogeochem Cycles.* 8: 279-293.
- Schjønning, P., Thomsen, I.K., Møberg, J.P., de Jonge, H., Kristensen, K., Christensen, B.T., 1999.** Turnover of organic matter in differently textured soils. I. Physical characteristics of structurally disturbed and intact soils. *Geoderma* 89, 177–198.
- Six, J., Elliot, E. and Pausitan, K. 2000.** Soil structure and organic matter: II A Normalized stability index and the effect of mineralogy. *Soil Sci Soc Ame J* 64: 1042–1049.
- Sollins, P., P. Homann, and B. A. Cadwell. 1996.** Stabilization and destabilization of soil organic matter: Mechanisms and controls. *Geoderma* 74: 65-105.

- Sommers, L.E., Gilmour, C.M., Wildung, R.E., Beck, S.M., 1981.** The effect of water potential on decomposition processes in soils. In: Parr, J.F., Gardner, W.R., Elliott, L.F. (Eds.), *Water Potential Relations in Soil Microbiology*, Special Publication number 9, Soil Science Society of America, Madison, pp. 97–117.
- Sorensen, L. H. 1981.** Carbon-nitrogen relationships during the humification of celulosa in soils containing different amounts of clay. *Soil Biol. Biochem.* 13: 313-321.
- Spain, A. 1990.** Influence of environmental conditions and some soil chemical properties on the carbon and nitrogen contents of some tropical Australian Rainforest Soils. *Aust. J. Soil Res.* 28: 825-839.
- Tisdall, J. M, Oades, J. M. 1982.** Organic matter and water stable aggregates in soils. *J. Soil Sci.* 33:141-163.
- Troare, O., Groleau-Renard, V., Plantureux, S., Tubeileh, A. and Boef-Tremblay, V. 2000.** Effect of root mucilage and modelled root exudates on soil structure. *Eur J Soil Sci* 51: 575–581.
- Varadachari, C., Mondal, A. and Ghose, K. 1995.** The influence of crystal edges in clay-humus complexation. *Soil Sci* 159: 185–190.
- Velde B., Barré P. 2010.** *Soils, Plants and Clay Minerals.* Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Virto, I., Barré, P. and Chenu, C. 2008.** Microaggregation and organic matter storage at the silt-size scale. *Geoderma* 146: 326–335.

## VII. MÚCILAGO DE NOPAL (*Opuntia spp.*) EN LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DEL SUELO.

### 7.1. RESUMEN

El presente estudio evaluó diferentes dosis de mucílago de nopal: Testigo (sin mucílago, únicamente con agua), T10-90, T40-60 y T80-20; donde, la primera cantidad corresponde al porcentaje de mucílago de nopal y la segunda al porcentaje de agua, formando ambas cantidades la solución aplicada a los suelos, los cuales se depositaron en cajas magenta. Se utilizó un suelo con textura arcillosa y uno con textura arenosa. Las cajas magenta se depositaron en una cámara de ambiente controlado a 25 °C y humedad relativa de 40%. Se realizaron tres muestreos; a los 7, 14 y 21 días después de la aplicación del mucílago. Entre las propiedades que se evaluaron se encuentran: estabilidad de agregados, estabilidad estructural, carbono orgánico, Nitrógeno total y relación carbono/ nitrógeno. En el suelo arcilloso el tratamiento con 80% de mucílago y 20% de agua, presentó los valores más altos en la estabilidad de los agregados, en los tamaños; >4.76, 3.36, 2.0, 1.0 y 0.5 mm, de igual manera, se observó en el tratamiento con 40% de mucílago y 60% de agua en los tamaños de agregados >4.76, 1.0 y 0.5 y 0.25 mm. El tratamiento con 80% de mucílago y 20% de agua presentó los valores más altos en los tres muestreos realizados para estabilidad estructural y contenido de nitrógeno total. Para el suelo arenoso el tratamiento con 40% de mucílago y 60% de agua presento los valores más altos para la estabilidad de agregados en los tamaños >4.76, 3.36, 2.0, 1.0, 0.5 y 0.25 mm. Seguido por el tratamiento con 80% de mucílago y 20% de agua en los agregados >4.76, 3.36, 2.0, 1.0, 0.5 mm. Para la estabilidad estructural y contenido de carbono orgánico el mejor tratamiento fue con 40% de mucílago y 60% de agua. Para contenido de nitrógeno total, el mejor tratamiento fue con 10% de mucílago y 90% de agua, mientras que para la relación carbono/nitrógeno fue el tratamiento con 80% de mucílago y 20% de agua.

**Palabras clave:** *macroagregacion, carbono orgánico, nopal.*

## 7.2. ABSTRACT

This study evaluated different doses of nopal mucilage: Witness (without mucilage with water only), T10-90, T40-60 and T80-20, where the first number corresponds to the percentage of cactus mucilage and the second to the percentage water, forming two quantities applied to the soil solution, which was deposited in magenta boxes. We used a clayey soil and one sandy texture. Magenta boxes were placed in a controlled environment chamber at 25 ° C and 40% relative humidity. Three samplings were performed, at 7, 14 and 21 days after application of mucilage. Among the properties that were evaluated include: aggregate stability, structural stability, organic carbon, total nitrogen and carbon / nitrogen ratio. In clay soil treatment with 80% mucilage and 20% water, showed higher values in the aggregate stability in sizes;> 4.76, 3.36, 2.0, 1.0 and 0.5 mm, similarly, the observed in the treatment with 40% and 60% mucilage in water aggregate sizes> 4.76, 1.0 and 0.5 and 0.25 mm. Treatment with 80% mucilage and 20% water showed higher values in the three samples taken for structural stability and total nitrogen content. For the sandy soil treatment with 40% mucilage and 60% water present higher values for aggregate stability in sizes> 4.76, 3.36, 2.0, 1.0, 0.5 and 0.25 mm. Followed by treatment with 80% and 20% mucilage in water aggregates> 4.76, 3.36, 2.0, 1.0, 0.5 mm. For structural stability and organic carbon content was the best treatment with 40% and 60% mucilage water. To total nitrogen content, the treatment was better with 10% mucilage and 90% water, while for the carbon / nitrogen treatment was 80% and 20% mucilage water.

**Keywords:** *macroaggregation, organic carbon, nopal.*

### 7.3. Introducción

La estructura del suelo es muy dinámica debido a que se ve afectada por la materia orgánica del suelo. Existen varias pruebas que han sido diseñadas para evaluar la estabilidad de la estructura del suelo, todas ellas son realizadas en los agregados. La estabilidad estructural de un suelo representa la habilidad para conservar la distribución y tamaño de sus agregados, después de exponerse a varias presiones (impacto de fuerzas externas, abrasión, etc.) (Carter, 2004). Los cambios del COS (carbono orgánico del suelo) están completamente asociados a los cambios de formas estructurales del suelo y su estabilidad. Por otro lado, las hifas fúngicas y polisacáridos que están íntimamente asociados con la fracción mineral parecen tener una participación importante en la estabilización de los agregados (Kay, 1997).

El retorno de residuos orgánicos al suelo tiende a incrementar la proporción de agregados estables en agua, Puesto que se ha obtenido una alta correlación entre el contenido de MOS y la estabilidad de los agregados para suelos con textura y contenidos mineralógicos similares (Campbell *et al.*, 1993a; Swift, 2001 y Martí *et al.*, 2001). Chenu *et al.* (2000) encontraron que la MOS (materia orgánica del suelo) asociada a minerales de arcilla provocó un incremento de la hidrofobicidad, característica que a su vez permite un incremento de la estabilidad de los agregados al agua. Al respecto, Six *et al.* (2000b) indicaron que un decremento de los contenidos de MOS en suelos dominados por arcilla 2:1 conllevó a una disminución de la estabilidad de los agregados del suelo, con excepción de la fracción de C (carbono) biológicamente no disponible o C vegetal; todos los componentes de la MOS contribuyen en la estabilización estructural de suelos minerales (Huang, 2004).

La estabilidad de los macroagregados de suelos cultivados fue significativamente más baja que en suelos forestales. Dicha estabilidad no se correlacionó con los constituyentes asociados con partículas de arcilla <2  $\mu\text{m}$ , tanto en suelo cultivado como en forestal (Caravaca *et al.*, 2004). Piccolo *et al.* (1997) encontraron mayor estabilidad en un suelo de la selva de Misiones, Argentina, que el mismo suelo bajo cultivo; la mayor proporción de peso de suelo se distribuyó en las fracciones de macroagregados (>250  $\mu\text{m}$ ) en cualquier condición.

En un pH ligeramente ácido del suelo, el  $\text{Fe}^{2+}$  actúa como elemento de unión entre la arcilla y la MO originando agregados moderadamente estables. Por otro lado, los compuestos húmicos pueden provocar revestimientos en los granos de cuarzo, dando lugar a endopedones espódicos Bs, esto hace disminuir el espacio poroso. En medios biológicamente activos ricos en bases, la polimerización da lugar a moléculas de gran tamaño, se forman complejos insolubles y agregados estables (Porta *et al.*, 1999). Sin embargo, Graham *et al.* (2002) atribuyen el incremento de la estabilidad de los agregados a un aumento de la proporción de los cationes intercambiables presentes en forma divalente.

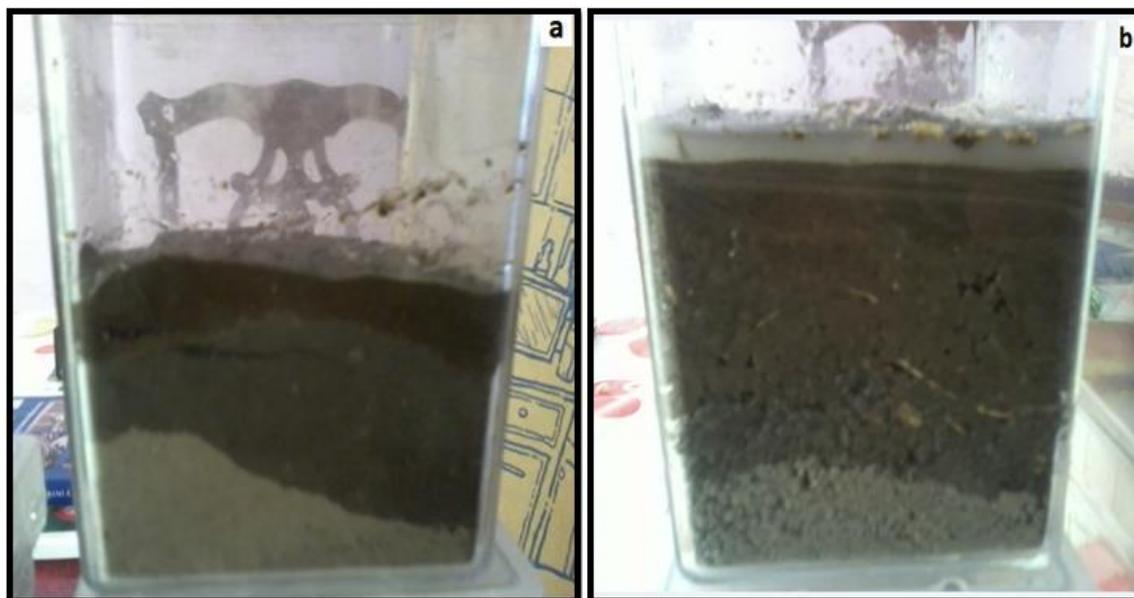
Además, la estabilidad de los microagregados obedece a la adsorción de polisacáridos derivados microbiológicamente, mucigel o mucílagos producidos por raíces de las plantas y algunas hifas fúngicas que se encuentran libres u ocluidas, de las uniones mediante grupos carboxílicos e hidroxilos adheridos a la superficie de partículas minerales arcillosas y puentes de  $\text{Ca}^{2+}$ , de ese modo, la arcilla permanece en un estado floculado o estable (Ladd *et al.*, 1996; Huang, 2004). Sin embargo, estos últimos autores señalaron que la actividad biológica puede tener un efecto desestabilizador de la estructura del suelo al actuar en la descomposición de los agentes ligantes. La estabilidad de los microagregados previene la desagregación completa del suelo; sin embargo, éstos llegan a ser eventualmente inestables si las reservas orgánicas son agotadas. En tanto, la estabilidad de los macroagregados está relacionada a la presencia de materia orgánica particulada (MOP) dada la existencia de redes de hifas fúngicas y raíces de plantas que físicamente enredan a los macroagregados (Ladd *et al.*, 1996).

La estabilidad de los agregados se relacionó más estrechamente al manejo de largo plazo que a un reciente manejo cultural. El cultivo frecuente, una adecuada fertilización y uso de leguminosas incrementó la estabilidad de los agregados en un sitio con más bajo contenido de MOS, presumiblemente como resultado de un reducido disturbio del suelo aunado, a un incremento de la producción de residuos de cultivo (Campbell *et al.*, 1993b). Nuttall *et al.* (1986) indicaron que la paja cortada y colocada sobre la superficie del suelo promueve la agregación en comparación con aquellos sitios donde fue incorporada.

## 7.4. MATERIALES Y MÉTODOS

### 7.4.1. Unidades experimentales

Las unidades experimentales constaron de cajas magenta (Figura 22) con capacidad para 400 mL, a las cuales se les agregaron 200 g de suelo por unidad experimental, tanto para el experimento en suelo arcilloso como para el experimento en suelo arenoso. El análisis de este trabajo fue cualitativo, por lo tanto no se utilizó diseño experimental ni repeticiones.



**Figura 22. Cajas magenta con 200 g de suelo: a) suelo arenoso y b) suelo arcilloso para los diferentes tratamientos de mucílago de nopal y su humedecimiento gradual.**

### 7.4.2. Tratamientos

Para cada uno de los suelos, tanto para el de textura arcillosa, como para el de textura arenosa, primeramente se determinaron en laboratorio las constantes de humedad (Figuras 23 y 24), capacidad de campo (CC) y punto de marchitamiento permanente (PMP). Una vez definidos los parámetros anteriores, se procedió al cálculo del porcentaje de humedad aprovechable y realizar los cálculos para los tratamientos. Se evaluaron cuatro tratamientos (Cuadros 6 y 7). Para su determinación, se consideró el perfil de humedad del suelo.

Cabe mencionar que por cuestiones económicas no se realizaron repeticiones de los tratamientos, por lo que este experimento, no se pudo evaluar de manera convencional.

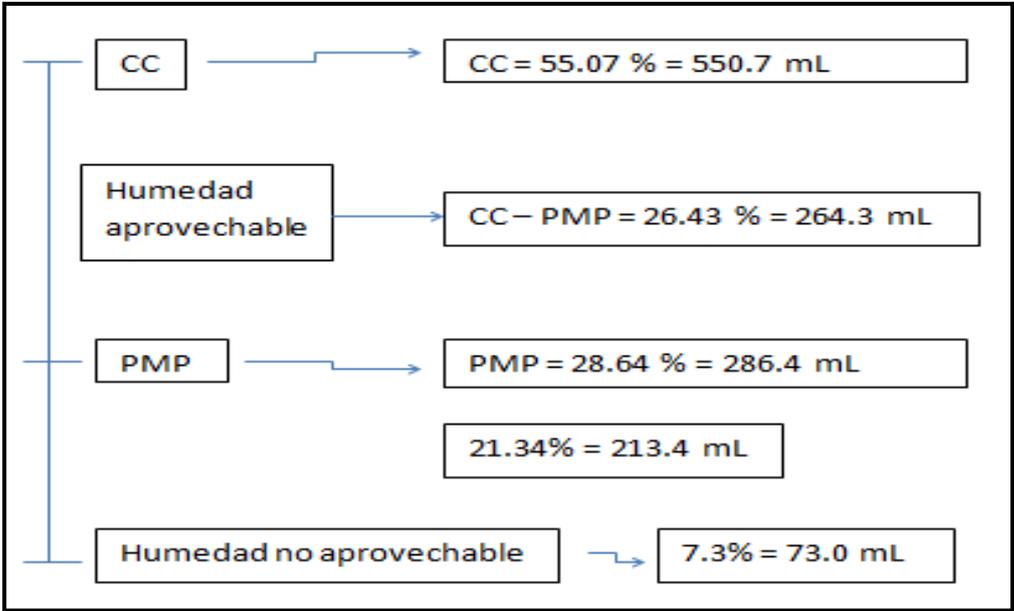


Figura 23. Perfil de humedecimiento del suelo arcilloso con las constantes de humedad, capacidad de campo (CC) y punto de marchitamiento permanente con la humedad aprovechable y no aprovechable.

Cuadro 6. Tratamientos aplicados al suelo arcilloso, para la primera columna tenemos que: T= Tratamiento, la primera cantidad corresponde al porcentaje de mucílago, la segunda al porcentaje de agua.

Tratamiento	Cantidad de mucílago (mL)	Cantidad de agua (mL)	Mucílago + agua (mL)	Diferencial de agua (mL)	Total de mL aplicados
T1=testigo	0	52.86	52.86	42.68	95.54
T2=10-90	5.28	47.58	52.86	42.68	95.54
T3=40-60	21.14	31.72	52.86	42.68	95.54
T4=80-20	42.29	10.57	52.86	42.68	95.54

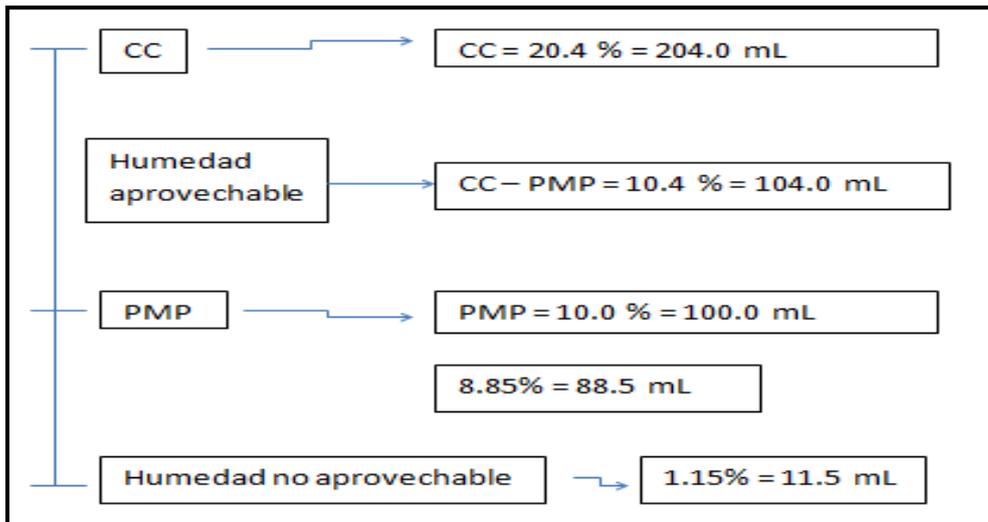


Figura 24. Perfil de humedecimiento del suelo arenoso con las constantes de humedad, capacidad de campo (CC) y punto de marchitamiento permanente con la humedad aprovechable y no aprovechable.

Cuadro 7. Tratamientos aplicados al suelo arenoso, para la primera columna tenemos que: T= Tratamiento, la primera cantidad corresponde al porcentaje de mucílago, la segunda al porcentaje de agua.

Tratamiento	Cantidad de mucilago (mL)	Cantidad de agua (mL)	Mucílago + agua (mL)	Diferencial de agua (mL)	Total mL aplicados
T1= testigo	0.0	20.80	20.8	17.10	37.9
T2=10-90	2.08	18.72	20.8	17.10	37.9
T3=40-60	8.32	12.48	20.8	17.10	37.9
T4=80-20	16.64	4.16	20.8	17.10	37.9

#### **7.4.3. Cámara de ambiente controlado.**

El experimento se realizó en ambiente controlado, para lo cual se utilizó una de las cámaras de ambiente controlado (Figura 25) que encuentra en las instalaciones del Postgrado de Botánica del C.P. Marca Sherer, modelo Cel 3714, A una temperatura de 25 °C y humedad relativa de 40% constantes.



**Figura 25. Cámara de ambiente controlado ubicada en el Postgrado de Botánica del C.P. Montecillo. Méx.**

#### **7.4.4. Evaluación de la variación de las propiedades físicas y químicas por el efecto de diferentes dosis de mucílago de nopal**

Entre las propiedades físicas y químicas propuestas, tanto para suelo arcilloso como para el arenoso y para los tres muestreos llevados a cabo:

La distribución del tamaño de partícula representa quizá la característica del suelo más estable y se encuentra relacionada con la actividad física y química del suelo. También, ha sido una forma estándar de caracterizar y clasificar las partículas sólidas del suelo, lo cual sirve como base para la clasificación textural.

La textura de un suelo con base en el análisis granulométrico, consiste en la separación y cuantificación de las partículas de arena, limo y arcilla de una muestra de suelo y en la consulta del triángulo de texturas. La cuantificación de partículas minerales puede realizarse por varios métodos. El de la pipeta al igual que otros métodos que se basan en la ley de Stokes, es el que se utilizará en la determinación granulométrica por ser más exacto.

#### **7.4.4.1. Distribución y estabilidad de los agregados en húmedo**

El suelo está formado por partículas primarias (arena, limo y arcilla) que se unen para formar unidades secundarias o agregados de diferentes tamaños. Los agregados del suelo se han dividido jerárquicamente en dos clases: microagregados (< 0.25 mm de diámetro) y macroagregados (> 0.25 mm de diámetro), los cuales dependen directamente de los agentes cementantes (orgánicos e inorgánicos). Para la reducción adecuada de los cultivos agrícolas, es condición que el suelo tenga una agregación deseable, que propicie el buen desarrollo de raíces, favorezca el drenaje, la retención de humedad (Sustaita, 1998).

Para la estabilidad de los agregados en húmedo se empleó el método de Yoder (Martí, 2001), para tal efecto, se pesaron 100 g de suelo seco al aire de cada muestra; cada muestra se colocó en la columna de tamices con las siguientes aperturas: 4.76, 3.36, 2.0, 1.0, 0.5 y 0.25 mm. Se emplearon dos columnas previamente calibradas respecto al nivel del agua y se activó dicho instrumento con las muestras durante 10 minutos. Posteriormente, se recolectó en un frasco de vidrio de 200 mL el material del suelo contenido en cada tamiz mediante lavados con agua corriente. Los frascos se calentaron a 105 °C, con el mínimo de agua posible durante 24 horas, se dejaron enfriar y se pesó por separado cada fracción. A cada frasco se agregó hexametáfosfato sódico al 10% hasta cubrir el nivel del material colectado. Se agitaron y se dejaron reposar por una hora.

Las arenas se separaron del material fino mediante lavado, utilizando cada tamiz de acuerdo al no. De apertura de malla y se recolectó el material grueso en el frasco correspondiente; nuevamente se sometieron a secado (105 °C) durante 24 horas y se pesó. Los resultados se expresan en porcentaje respecto a la muestra total, excluyendo el peso de las arenas.

#### **7.4.4.2. Estabilidad estructural**

Se evaluó por el método propuesto por Kempel y Chepil (1965), que consiste en tomar una muestra de suelo de 200 g previamente seco y pasado por una serie de tamices (de 4.76, 3.36, 2.0, 1.0, 0.5 y 0.25 mm de diámetro) en un aparato diseñado para levantar y bajar los mismos, dentro de un contenedor con agua. El movimiento continuo de los tamices (durante 5 minutos) dentro del agua causa degradación de los agregados, cuya magnitud se cuantifica con la cantidad retenida en cada tamiz. Los cálculos se realizaron mediante la siguiente relación:

$EA = [Pa / (Ps - P_{sim})] \times 100$ , donde:

EA= Estabilidad de agregados (%)

Ps= Peso del suelo (g)

Pa= Peso de agregados (g)

P<sub>sim</sub>= Peso de las arenas (g)

La suma total del porcentaje de agregados estables retenidos en los tamices proporciona el porcentaje total de la estabilidad de agregados del suelo.

#### **7.4.4.3. Determinación del carbono orgánico**

El contenido de la materia orgánica se determinó por el método de Walkley y Black (1947), basado en la oxidación de la materia orgánica del suelo con un exceso de dicromato de potasio (agente oxidante) y la determinación de dicho exceso por medio de la titulación con una solución de sulfato ferroso de normalidad conocida (agente reductor). La determinación del carbono orgánico se realizó mediante la siguiente fórmula:

$$M.O = C.O \times 1.724$$

Dónde:

M.O = Materia orgánica (%)

C.O = Carbono orgánico del suelo (%)

1.724 = Factor de conversión, considera que el 58% de la M.O. del suelo es carbono orgánico.

#### **7.4.4.4. Nitrógeno total (%)**

Para la obtención del contenido de nitrógeno total del suelo, se utilizó el método de semi-micro-kjeldahl. Se basa en la oxidación de la materia orgánica del suelo con una mezcla ácida. Se colocaron 0.25 g de suelo seco, tamizado por malla 0.5 mm en un matraz micro-kjeldahl. Posteriormente, se le agregó la mezcla de catalizadores, ácido sulfúrico concentrado, se digirió, destiló y por último se tituló con H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0.01 N (Bremner, 1965).

$$N (\%) = [(V_{\text{muestra}} - V_{\text{blanco}}) \times N_{\text{ácido}} \times 14] / (\text{peso de la muestra} \times 10)$$

Dónde:

V<sub>muestra</sub> = volumen del ácido sulfúrico para titular la muestra en mL

V<sub>blanco</sub> = volumen del ácido sulfúrico para titular el blanco en mL

N = normalidad del ácido sulfúrico

14 = peso mili-equivalente del nitrógeno

1/10 = factor para convertir en porcentaje (100/1000)

Peso de la muestra en gramos.

#### **7.4.4.5. Relación carbono/Nitrógeno (C/N)**

Se obtuvo de manera indirecta, considerando los resultados que se obtuvieron de los contenidos de carbono y nitrógeno del suelo.

### **7.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

Los resultados de los análisis físicos y químicos de las propiedades del suelo para cada uno de los tratamientos en los diferentes tiempos muestreos y para cada textura de suelo se mencionan a continuación:

#### **7.5.1. Distribución del tamaño de partícula**

El Cuadro 8, resume los porcentajes para cada uno de los componentes de la textura arcillosa y arenosa:

**Cuadro 8: Distribución del tamaño de partícula sin mucílago de nopal, con sus respectivos porcentajes.**

SUELO	COMPONENTES			CLASE TEXTURAL
	ARCILLA (%)	LIMO (%)	ARENA (%)	
ARCILLOSO	63.0	18.0	19.0	Arcilloso
ARENOSO	13.0	20.0	67.0	Migajón arenoso

La determinación de la distribución del tamaño de partícula es una característica importante debido a que afecta las propiedades físicas, químicas y biológicas. En términos generales, los suelos se clasifican en textura gruesa y fina. En los suelos de textura fina predomina la arcilla y tienen una mayor superficie activa que los suelos de textura gruesa (arenosos), poseen mayor capacidad de adsorción de nutrientes y usualmente son más fértiles; los suelos arenosos son más porosos y permiten una rápida infiltración del agua. Los suelos arcillosos poseen mayor capacidad de retención de agua, debido a su mayor área superficial y presentan un mayor espacio poroso total que los suelos arenosos. Ésta diferencia se debe al mayor número de microporos que actúan en la retención del agua, mientras que en los suelos arenosos existen más macroporos que facilitan el movimiento del aire y del agua (Ortiz y Ortiz, 2001).

La distribución del tamaño de partícula del suelo, influye en el grado de estructuración, la que a su vez influye en la cantidad y movimiento del agua que puede almacenar un suelo y la facilidad de abastecimiento de nutrientes, aire y calor. Si bien, la distribución del tamaño de partícula no es fácil de cambiar, la estructura puede ser alterada para fomentar la formación de agregados de tamaños variables. Por ejemplo, los suelos de textura franco, franco arcilloso y franco arenoso con contenidos de materia orgánica de media a alta, conservan una estructura favorable durante periodos largos, requiriendo un mínimo de laboreo. En cambio, los suelos arcillosos con alto porcentaje de arcilla y limos tienen una fuerte tendencia a compactarse, restringiendo el movimiento del agua y nutrimentos; por lo tanto, a menos que se logre estabilizar su estructura, necesitan de la labranza (Lomelí, 1996).

### **7.5.2. Estabilidad de los agregados en húmedo en suelos con textura arcillosa y arenosa**

Los resultados sobre la estabilidad estructural para diferentes tamaños de agregados en tres muestreos y tratamientos evaluados, tanto para el suelo de textura arcillosa como para el de textura arenosa se muestran en el Cuadro 9, las Figura 26 y Cuadro 10, Figura 27, respectivamente.

Para el suelo arcilloso el tamaño de agregado de  $> 4.75$  mm, presentó los valores más altos en el tratamiento con 80% de mucílago y 20% de agua en los muestreos 7 y 14 días. Mientras que en el tratamiento con 60% de mucílago y 40% de agua en el primer muestreo, este tamaño de agregado ( $> 4.75$  mm) presentó el valor más alto. En el último muestreo que fue a los 21 días, la estabilidad de los agregados en los cuatro tratamientos se colapsó, lo cual provocó que la estructura desapareciera.

En la fracción de agregados entre 4.75 - 3.36 mm, el valor más alto de estabilidad fue en el tratamiento con 80% de mucílago y 20% de agua. Mientras, que los tratamientos con 10% de mucílago y 90% de agua, y 40% de mucílago y 60% de agua presentaron una ligera estabilidad en los tres muestreos. Por último, la estabilidad estructural del testigo desapareció (Figura 26).

En la fracción 3.36 - 2.0 mm, el valor más alto fue para el tratamiento con 80% de mucílago y 20% de agua en la primera y tercer semanas de muestreo. Los tratamientos Testigo, con 10% de mucílago y 90% de agua, y 40% de mucílago y 60% de agua en el primer y segundo muestreo presentaron poca estabilidad, la cual en el último muestreo todavía tendió a disminuir (Figura 26).

Un fenómeno parecido sucedió en el tamaño 2.0 – 1.0 mm, donde los mayores valores de estructuración correspondieron al tratamiento con 80% de mucílago y 20% de agua en los tres muestreos. Los tratamientos Testigo, con 10% de mucílago y 90% de agua, y 40% de mucílago y 60% de agua presentaron un aumento en su estabilidad, pero al igual que el tratamiento con 80% de mucílago y 20% de agua, en todos se presentó una disminución de la estabilidad estructural en el último muestreo (Figura 26).

Los mayores valores de estructuración en el tamaño de agregado 1.0 – 0.5 mm fueron para el tratamiento 40% de mucílago y 60% de agua en el tercer muestreo y para el tratamiento con 80% de mucílago y 20% de agua en los muestreos 7 y 14 días. En todos los tratamientos el valor de la estabilidad estructural se incrementa en el primer muestreo, pero en el último tiende a disminuir (Figura 26).

En el último tamaño de agregado de 0.5 a 0.25 mm, los valores más altos de estabilidad estructural correspondieron al tratamiento con 10% de mucílago y 90% de agua en el primer y tercer muestreo. Así mismo, para el tratamiento 40% de mucílago y 60% de agua en el segundo muestreo (Figura 26).

**Cuadro 9. Estabilidad de los agregados en húmedo en suelo arcilloso.**

Tamiz	>4.76 (mm)			4.76 - 3.36 (mm)			3.36 - 2.0 (mm)			2.0 – 1.0 (mm)			1.0 – 0.5 (mm)			0.5 – 0.25 (mm)		
	7	14	21	7	14	21	7	14	21	7	14	21	7	14	21	7	14	21
<b>Testigo</b>	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.3	0.3	0.1	0.5	0.3	0.3	8.8	3.5	9.3	16.2	18.6	16.8
<b>T10-90</b>	0.1	0.1	0.0	0.2	0.2	0.1	0.5	0.3	0.3	1.0	0.4	0.5	8.8	2.7	8.4	26.6	20.7	20.0
<b>T40-60</b>	0.4	0.2	0.0	0.2	0.2	0.2	0.5	0.2	0.2	1.4	0.4	0.7	22.3	3.8	17.8	15.2	21.3	19.2
<b>T80-20</b>	0.4	0.3	0.0	0.8	0.2	0.2	2.1	0.3	0.5	4.7	0.9	0.8	23.5	13.4	16.8	20.2	12.5	14.6

T=tratamiento, la primera cantidad es el porcentaje de mucílago aplicado y la segunda el porcentaje de agua

m= muestreos.

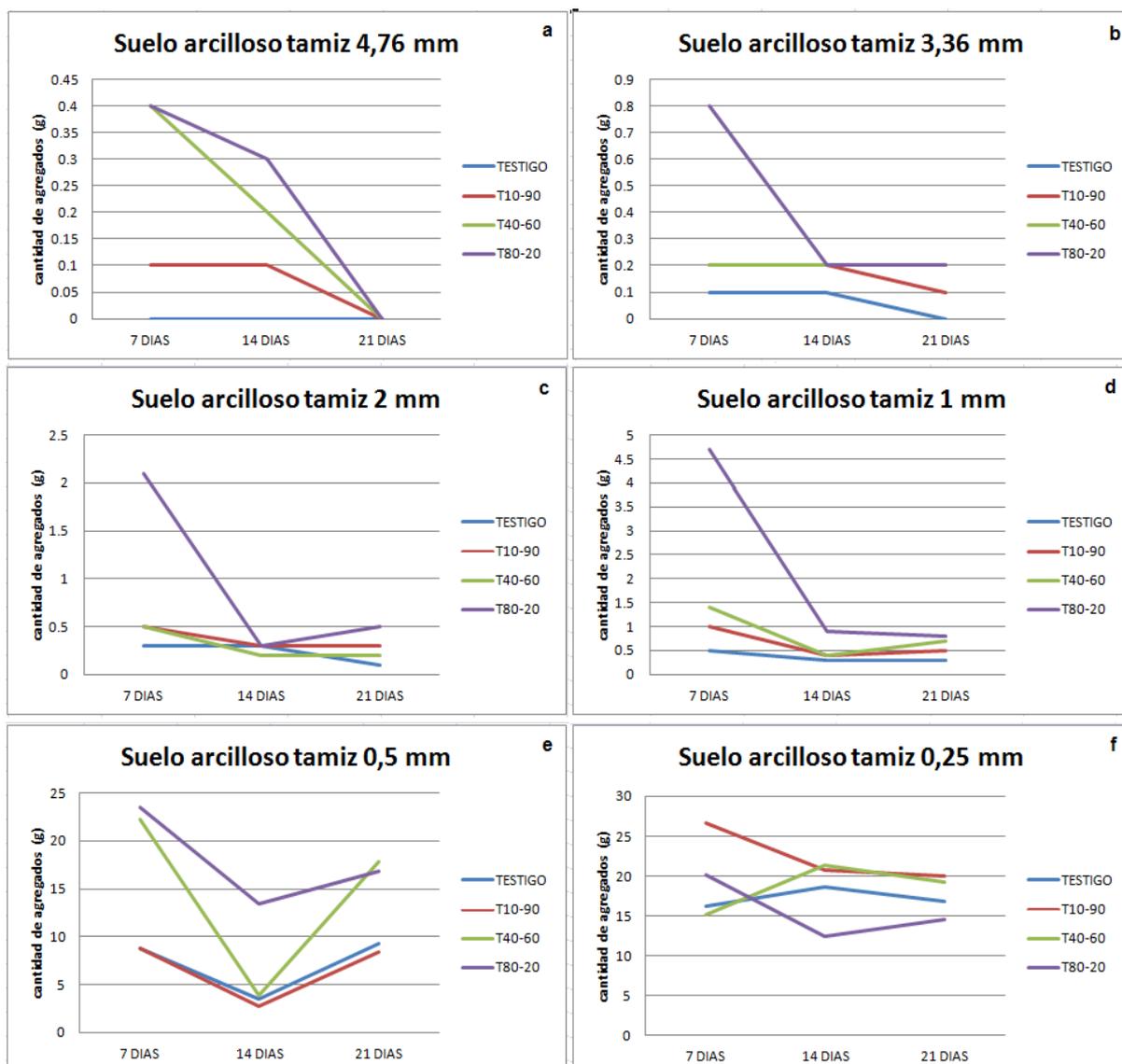


Figura 26. Estabilidad de diferentes tamaños de agregados para el suelo de textura arcillosa; tres en muestreos y los diferentes tratamientos evaluados.

Para el suelo arenoso; el tamaño de agregado  $> 4.76$  presentó la mejor estabilidad en el tratamiento con 10% de mucílago y 90% de agua en los muestreos 7 y 14 días, mientras que el tratamiento 40% de mucílago y 60% de agua en el muestreo realizado a los 7 días. En el tercer muestreo, realizado a los 21 días, la estabilidad estructural en todos los tratamientos desapareció (Figura 27).

El tamaño de agregado entre  $4.76 - 3.36$  la mejor estabilidad de los agregados fue para el tratamiento con 80% de mucílago y 20% de agua en los muestreos uno y dos. El tratamiento con 40% de mucílago y 60% de agua la mejor estabilidad fue en el tercer muestreo (Figura 27).

El tamaño de agregado entre  $3.36 - 2.0$  presentó los mejores valores de estabilidad en el tratamiento con 40% de mucílago y 60% de agua en los muestreos uno y tres. El tratamiento con 80% de mucílago y 20% de agua su valor de estabilidad fue en el muestreo uno (Figura 27).

La estabilidad estructural en el tamaño de agregado entre  $2.0 - 1.0$  mm, los valores más altos fueron para los tratamientos con 40% de mucílago y 60% de agua y con 80% de mucílago y 20% de agua. Pero, a partir de este tamaño de agregado, en los subsiguientes tamaños de agregados la estabilidad se incrementó.

La estabilidad para el tamaño de agregado de  $1.0 - 0.5$  mm, el tratamiento con 40% de mucílago y 60% de agua con valores más altos los muestreos uno y dos. Así mismo, el tratamiento con 80% de mucílago y 20% de agua obtuvo el valor más alto solamente en el muestreo tres (Figura 27).

Por último, la estabilidad de los agregados para el tamaño  $0.5 - 0.25$ , los valores más altos fueron para el tratamiento con 40% de mucílago y 60% de agua en los muestreos segundo y tercero, mientras que el tratamiento con 80% de mucílago y 20% de agua en el muestreo primero (Figura 27).

**Cuadro 10. Estabilidad de los agregados en húmedo para el suelo con textura arenosa.**

Tamiz	>4.76 (mm)			4.76 - 3.36 (mm)			3.36 - 2.0 (mm)			2.0 – 1.0 (mm)			1.0 – 0.5 (mm)			0.5 – 0.25 (mm)		
	7	14	21	7	14	21	7	14	21	7	14	21	7	14	21	7	14	21
<b>Testigo</b>	0.0	0.1	0.0	0.0	0.2	0.3	0.4	1.2	0.9	5.9	6.0	5.2	21.0	16.2	15.1	12.6	18.3	15.8
<b>T10-90</b>	0.3	0.5	0.0	0.3	0.1	0.5	1.6	1.1	2.1	6.3	6.1	6.3	21.2	17.4	15.9	17.8	21.1	22.1
<b>T40-60</b>	0.3	0.3	0.0	0.4	0.4	1.3	1.7	2.0	3.0	8.8	6.6	7.2	30.7	19.9	17.1	13.7	25.2	25.6
<b>T80-20</b>	0.0	0.4	0.0	0.6	0.7	1.2	2.2	1.9	2.5	7.9	7.8	7.2	24.6	18.5	19.8	22.8	21.8	21.2

T=tratamiento, la primera cantidad es el porcentaje de mucílago aplicado y la segunda el porcentaje de agua  
m= muestreos.

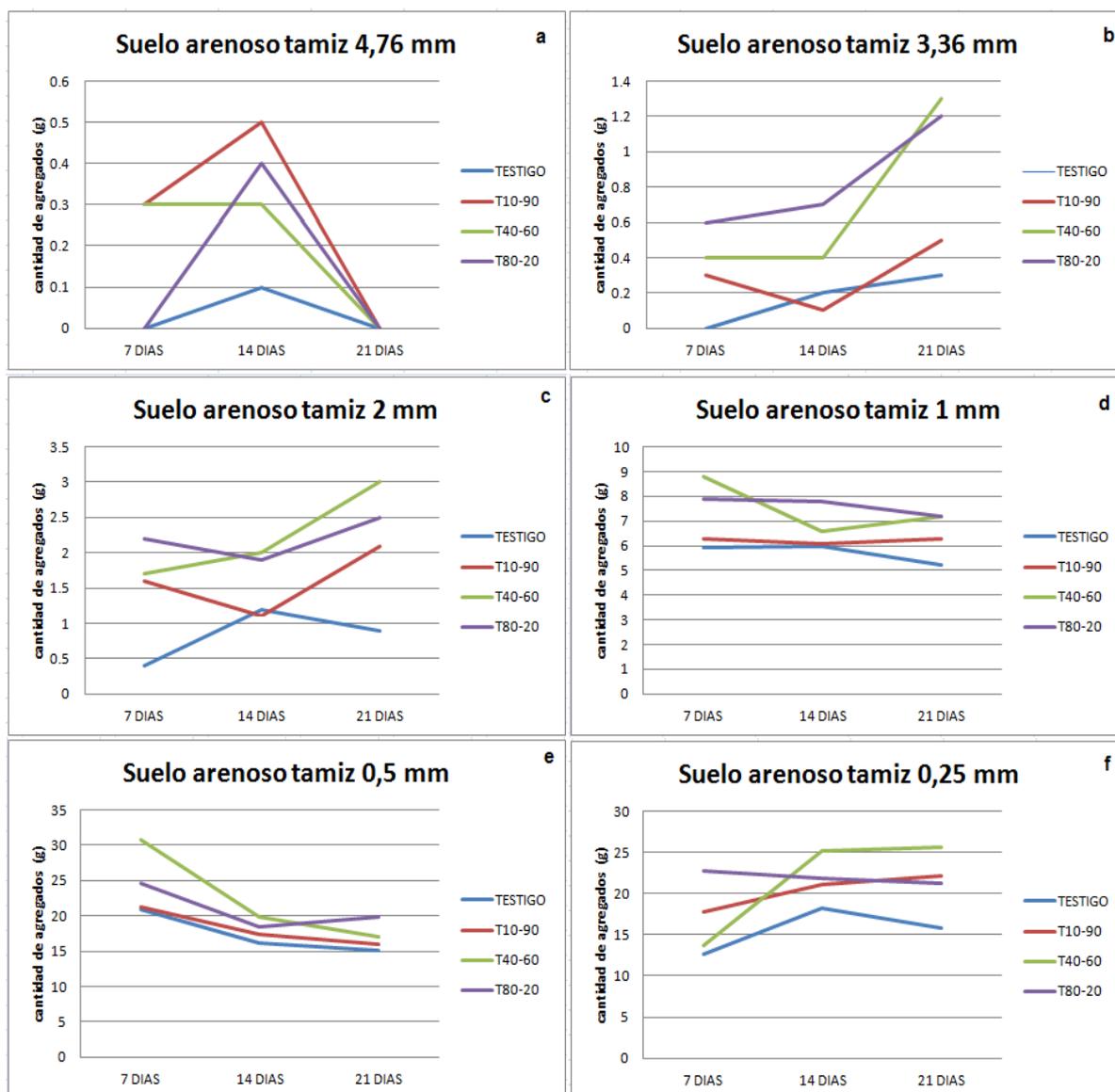


Figura 27. Estabilidad de diferentes tamaños para el suelo de textura arenosa, considerando tres muestreos y los tratamientos evaluados.

### 7.5.3. Estabilidad estructural

Los resultados de la estabilidad estructural (%) se muestran a continuación en el Cuadro 11 y Figura 28a para el suelo con textura arcillosa. Mientras que, para el suelo de textura arenosa, la información se resume en el Cuadro 12 y la Figura 28b.

El suelo arcilloso (Cuadro 11 y Figura 26a); muestra el mayor porcentaje de estabilidad a los 7 días después de la aplicación de mucílago de nopal, correspondió a

tratamiento con 80% de mucílago y 20% de agua (51.7%), seguido por con 40% de mucílago y 60% de agua (40.0%), con 10% de mucílago y 90% de agua (37.2%) y por último el Testigo (25.9%). Para que posteriormente a los 14 días se presentara una declinación del porcentaje de estabilidad estructural en cada uno de los tratamientos utilizados con los siguientes resultados: Tratamiento con 80% de mucílago y 20% de agua (27.38%), con 40% de mucílago y 60% de agua (26.02%), con 10% de mucílago y 90% de agua (24.24%) y Testigo (22.49%). Por último, a los 21 días se pudo observar incremento en la estabilidad estructural en cada uno de los tratamientos que se utilizaron quedando de la siguiente forma: el mayor porcentaje de estabilidad fue para el tratamiento con 40% de mucílago y 60% de agua (37.85%), seguido por con 80% de mucílago y 20% de agua (32.69%), con 10% de mucílago y 90% de agua (29.08%) y Testigo (26.05%). La información anterior mostró que el mejor tratamiento en la estabilidad estructural fue para el tratamiento con 80% de mucílago y 20% de agua.

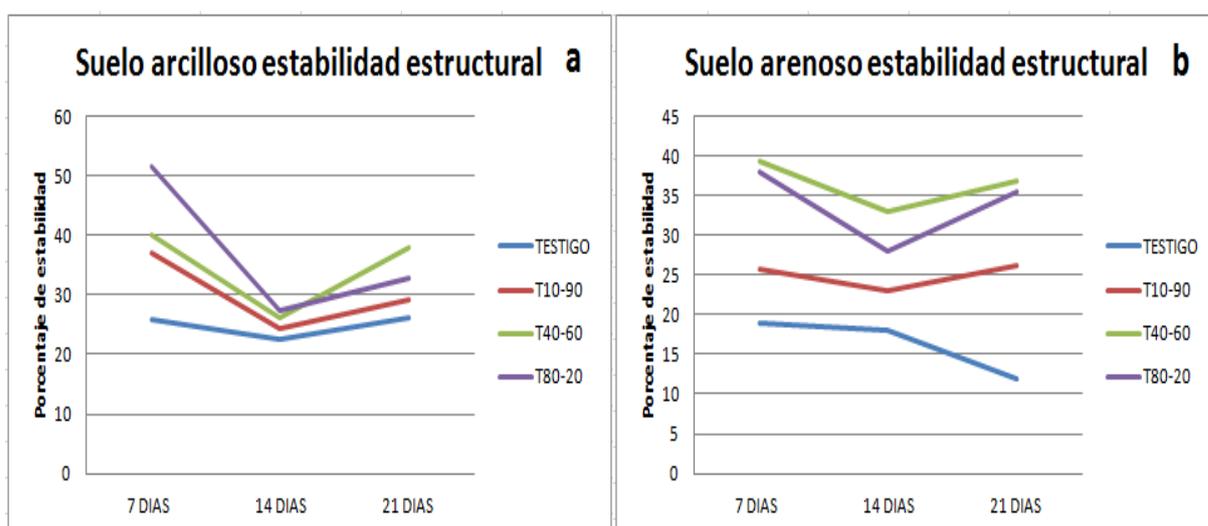
Para el suelo arenoso (Cuadro 12 y Figura 28b), el comportamiento de la estabilidad estructural en el suelo arenoso a través de los tres muestreos realizados en el transcurso de 21 días después de la aplicación de diferentes dosis de nopal. Como puede observarse, a los 7 días, el porcentaje de estabilidad estructural de mayor a menor fue de la siguiente manera: 39.42%, 37.92%, 25.74% y 19.0%, para los tratamientos: con 40% de mucílago y 60% de agua, con 80% de mucílago y 20% de agua, con 10% de mucílago y 90% de agua T10-90 y Testigo, respectivamente. A los 14 días se presenta una disminución de la estabilidad estructural en los cuatro tratamientos, quedando de la siguiente manera: 32.94%, 28.08%, 23.06%, 18.07% para los tratamientos con 40% de mucílago y 60% de agua, con 80% de mucílago y 20% de agua, con 10% de mucílago y 90% de agua y Testigo, respectivamente. Posteriormente a los 21 días se observó la tendencia a incrementarse dicha estabilidad, con excepción del testigo que siempre fue a la baja. El incremento en la estabilidad estructural fue siguiente: 36.97%, 35.59%, 26.19% y 11.84% para los tratamientos con 40% de mucílago y 60% de agua, con 80% de mucílago y 20% de agua, con 10% de mucílago y 90% de agua y Testigo, respectivamente.

**Cuadro 11. Estabilidad estructural (%) para el suelo arcilloso.**

Tratamientos/muestreos (días).	7 días	14 días	21 días
Testigo	25.9	22.5	26.0
T10-90	37.2	24.4	29.1
T40-60	40.0	26.0	37.8
T80-28	51.7	27.4	32.7

**Cuadro 12. Estabilidad estructural para el suelo arenoso.**

Tratamientos/muestreos (días).	1 (7 días)	2 (14 días)	3 (21 días)
Testigo	19.0	18.1	11.8
T10-90	25.7	23.1	26.2
T40-60	39.4	32.9	37.0
T80-20	37.9	28.1	35.6



**Figura 28. Estabilidad estructural para suelo de textura: a) arcillosa y b) arenosa. Para cada uno de los tratamientos y muestreos empleados.**

El mejoramiento de la estabilidad estructural del suelo se ha obtenido a menudo por la adición de materia orgánica al suelo (Le Bissonnais y Arrouays, 1997; Kay y Angers, 1999; Franzluebbers, 2002; Kong *et al.*, 2005; Cosentino *et al.*, 2006). En general, se habla de que la materia orgánica restringe la expansión diferencial y disminuye la presión interna máxima alcanzada en la fase de humedecimiento mediante la reducción rápida de la entrada del agua en el agregado (acción de humectabilidad) (Panabokke y Quirk, 1957; Sullivan, 1990; Caron *et al.*, 1996). La presión máxima probable puede ser generada por el aire atrapado y depende, tanto de la velocidad de entrada de líquido (agua, etc) dentro del espacio poroso del agregado (Wallis y Horne, 1992) y las posibilidades de liberación de una porción del aire (Concret, 1967b; Quirk y Williams, 1974; Caron *et al.*, 1998).

En la estabilidad estructural la naturaleza de los materiales orgánicos asociados con cada nivel de agregación varían. En la escala de paquetes de arcillas, la agregación está principalmente dictada por las propiedades mineralógicas y químicas del suelo y son importantes en el control de la extensión de la dispersión y es a menudo una función de los procesos pedológicos. La unión de los paquetes de arcilla para formar microagregados se produce a través de una serie de mecanismos. El mecanismo dominante se ha propuesto que implica pegamentos a base de polisacáridos (mucílagos o mucigeles) producidos por las raíces de plantas y microorganismos del suelo (Ladd *et al.*, 1996).

Los mucílagos como parte de los carbohidratos, tienen su origen en los residuos de plantas y animales, gomas extracelulares producidas por microorganismos y de sus tejidos celulares. De todos los componentes de la MOS, los carbohidratos son los más rápidamente disponibles para los microorganismos como fuente de alimento y energía. En los suelos, ellos mejoran la agregación y la estabilidad estructural de las partículas del suelo, como sucedió con los tratamientos con mayor cantidad mucílago de nopal (Cheshire, 1979b).

#### **7.5.4. Contenido de carbono (%)**

Los resultados para el suelo arcilloso se muestran en el Cuadro 13, Figura 29a, mientras que para el suelo arenoso en el cuadro 13, figura 29b.

Para el suelo arcilloso (Cuadro 13 y Figura 29a), los mayores contenidos de carbono orgánico en los tratamientos con 10% de mucílago y 90% de agua y con 40% de mucílago y 60% de agua con 1.19% para ambos tratamientos en el muestreo a los siete días. Mientras, que para el muestre a los 14 días, los mayores porcentajes de carbono fueron para los tratamientos Testigo y con 40% de mucílago y 60% de agua. Por último, para el último tratamiento que se realizó a los 21 días, el tratamiento con 80% de mucílago y 20% de agua presentó el porcentaje más alto, con 1.26%.

El carbono orgánico del suelo (COS) consta de una gran variedad de compuestos orgánicos. Sin embargo, generalmente clasifican en tres fracciones, de acuerdo con su tasa de mineralización o retorno. Los compuestos lábiles/activos o fácilmente mineralizable, tales como los azúcares simples, junto con la biomasa microbiana y fúngica, comprenden de 5-15% del carbono orgánico total del suelo. Su tasa de retorno de esta fracción oscila entre meses y años. La fracción intermedia, comprende de 20-40% del total de carbono orgánico del suelo, y su tasa de rotación se extiende durante varias décadas. La fracción estable o recalcitrante comprende el restante 60-70% del total de carbono orgánico del suelo, con tiempo de rotación de cientos a miles de años (Lichtfouse 1997; Rice 2002).

Para el suelo arenoso (Cuadro 13 y Figura 29b), el contenido de carbono orgánico y su distribución en los diferentes tratamientos se puede observar el Cuadro 15. Para los tratamiento con 10% de mucílago y 90% de agua y con 40% de mucílago y 60% de agua, en el primer muestreo, el contenido de carbono para ambos fue de 1.19%. Para el segundo muestreo, los tratamientos Testigo y con 40% de mucílago y 60% de agua presentaron el mayor porcentaje de carbono, con 1.19 para ambos tratamientos. Para el último muestreo, el mayor porcentaje de carbono orgánico fue para el tratamiento con 80% de mucílago y 20% de agua

El COS está determinado por las características químicas y físicas del suelo. Por ejemplo, existe una fuerte relación entre la materia orgánica del suelo (MOS) y nutrientes y el ciclo de almacenamiento (Lal *et al.*, 2007). Desde que el COS está principalmente asociado con las partículas finas del suelo, en especial la fracción de arcilla (Greene y Tongway, 1989), se modifica la estructura del suelo a través de disminución de la densidad aparente del suelo, el aumento en proporción de macroagregados (Oades y Aguas, 1991), su estabilidad y la macroporosidad.

Son varios los factores que moderan las tasas de descomposición del COS. Esta última está determinada por la relación C: N; > 30 retarda la descomposición o la descomposición es lenta, y <20 es más rápida. También régimen de temperatura del suelo controla la descomposición; al incrementarse la temperatura, la actividad microbiana aumenta. Generalmente, por cada 10 ° C de aumento de temperatura, la actividad microbiana se duplica. El contenido de humedad del suelo es también una importante determinante de la velocidad de descomposición. La actividad óptima microbiana óptimo se produce en el campo cerca de la capacidad de campo, cuando ~ 60% de los poros del suelo se llenan con agua (Rice 2002).

El carbono orgánico particulado (COP) es una fracción gruesa (50-2,000  $\mu$ m) de la MO que se deriva de restos semidescompuestos o descompuestos que se pueden localizar tanto por encima de la superficie del suelo como en forma subterránea. Su concentración es mayor cerca de la superficie del suelo que en las capas más profundas del suelo (Franzleubbers 2009). Esta fracción es altamente vulnerable a las perturbaciones por labranza. La labranza también aumenta la ruptura de macroagregados, que protegen COS de consumo de la fauna del suelo y microorganismos (Six *et al.* 2000). La mineralización del COP en los macroagregados anteriormente formados es rápida, lo que sugiere que esta fracción también es muy propensa a la labranza. La labranza también estimula la actividad microbiana del suelo. La fracción biológicamente activa del COS, modera el ciclo de los nutrientes y la descomposición del material vegetativo. Se incluye la biomasa microbiana y el carbono fácilmente mineralizable (C) y nitrógeno (N), los cuales tiene un corto tiempo de renovación, y con facilidad se convierten en una parte del carbono activo del suelo.

Por lo tanto, la inversión del suelo por la labranza conduce a un agotamiento del C y N mineralizables, por lo cual contribuyen a sus pools en el suelo (Franzleubbers 2009).

Materia orgánica exógena (MOE), tales como el compost maduro agregado a los suelos, puede también ser capaz de reducir la mineralización biológica de los polisacáridos lábiles debido al progresivo encapsulado en dominios hidrofóbicos de compost. En un experimento a largo plazo (1 año), Piccolo et al. (2004) trataron tanto un arenoso y un suelo franco-limoso. El compost maduro indujo una reducción significativa de las pérdidas de CO en ambos suelos, confirmando así que la materia orgánica lábil en los suelos puede ser protegido de la biodegradación por la repartición en los dominios hidrófobos de la materia orgánica estable humificada. Este estudio sugiere que el compost maduro y ácidos húmicos pueden resultar útiles para integrar prácticas de manejo destinadas a retener el carbono orgánico en los suelos.

El carbono orgánico del suelo tiene un efecto importante en la agregación de las partículas del suelo (Follett y Stewart, 1985), existiendo una relación entre tamaño de los agregados y contenido de COS. Mientras mayor es el contenido de COS lábil, mayor es el tamaño de los agregados (Buyanovsky *et al.*, 1994). A su vez, los agregados de menor tamaño están asociados a la fracción altamente humificada con período de residencia en el suelo mayor a siete años (Buyanovsky *et al.*, 1994). Rothon (2000) encontró una correlación positiva entre el porcentaje de estabilidad de los agregados y el contenido de MOS. Similares resultados fueron obtenidos por Chaney y Swift (1984) en 26 suelos británicos y Caravaca *et al.* (2001) en dos suelos semiáridos de España.

Six *et al.* (2000) propusieron un modelo del ciclo de formación y destrucción de los agregados del suelo. Los procesos representados en el modelo son el resultado de una interrelación entre macroagregados, el ciclo de la MOS y factores de control como la perturbación por labranza. El ciclo comienza cuando se forma un agregado, luego se hace inestable y eventualmente es destruido. La perturbación ocurrida por la labranza, acorta el “ciclo de vida” de un macroagregado disminuyendo la formación de nuevos microagregados y la captura de C dentro de ellos (Six *et al.*, 2000).

Sun *et al.* (1995) registraron que la composición química de los residuos, influye en la permanencia de los cambios. Ellos señalaron que los residuos que se descomponen rápidamente producen un cambio rápido pero temporal en la agregación, mientras que, los residuos que se descomponen más lentamente ofrecen un cambio más prolongado. Martens (2000) mencionó que los residuos de cultivos difirieron en su habilidad para promover la agregación y que los suelos que retienen residuos de maíz contienen agregados con diámetros medios ponderados (DMP) más grandes que aquellos suelos que retienen residuos de soya. Blair *et al.* (1997) argumentaron que una disminución en el C-total del suelo, particularmente del C-lábil causa una disminución del DMP, mientras que Balcke *et al.* (2002) mostraron que los materiales ricos en C presentan mayor aromaticidad y son preferentes para formar complejos arcillo-húmicos estables, ya que poseen mayor afinidad de adsorción sobre la superficie de las arcillas.

Aoyama *et al.* (1999) encontraron que los aportes de estiércol al suelo, incrementaron el contenido de la MOS y consecuentemente aumentó la cantidad de macroagregados estables. De acuerdo con Six *et al.* (1999) y Lupwayi *et al.* (2001) los agregados estables en agua (AEA) mayores a 250  $\mu\text{m}$ , responden rápidamente a los aportes de enmiendas orgánicas. Kushwaha *et al.* (2001) citaron que la conservación de rastrojos en parcelas agrícolas, aumenta dramáticamente la proporción de los agregados mayores a 4.75 mm. Además, ellos señalaron que los agregados más pequeños (0.53 - 2.0 mm) se presentan en menor número en los suelos donde se conservan los residuos de cosecha. Grandy *et al.* (2002) observaron un incremento en los agregados grandes (> 2 mm) y medios (1 - 2 mm) entre el primero y segundo año posterior a la aplicación de una enmienda orgánica. Además, ellos señalaron que la influencia de las enmiendas sobre la estabilidad los AEA es rápida y persistente, por lo que después de una aplicación, no se necesita de C en la superficie y, esto puede aumentar la estabilidad estructural, particularmente la de los macroagregados.

Bernoux *et al.* (1998) señalaron que para poder valorar la sustentabilidad de los sistemas agrícolas, se requiere analizar con precisión los cambios en cantidad, naturaleza y dinámica de la MOS, así como la estimación de los flujos de C entre el suelo y la atmósfera. De acuerdo con Espinoza (2003) la incorporación de residuos, en un sistema de siembra directa con rotación maíz-frijol, incrementa la cantidad de macroagregados (250-2000  $\mu\text{m}$ ), por lo que la posibilidad de conservar el C en el suelo aumenta.

Por el contrario, el descenso de la MOS disminuye drásticamente el C lábil proveniente de la biomasa microbiana, lo que incrementa la microagregación y disminuye la macroagregación. De la misma manera, Kong *et al.* (2005) señalaron que la estabilidad de los agregados se incrementa linealmente con la entrada de C vía aportes de residuos ( $r = 0.75$ ;  $p \leq 0.001$ ) y con el carbono orgánico del suelo (COS) ( $r = 0.63$ ,  $p \leq 0.005$ ). Al respecto, Mikha y Rice (2004) argumentaron que el aporte de estiércoles incrementaron significativamente la proporción de agregados mayores a 2 mm. Dicho incremento es atribuido a la entrada de residuos orgánicos frescos y a la disponibilidad de C, lo que incrementa la actividad microbiana, la cual produce sustancias que sirven como agentes enlazantes entre partículas y microagregados. Por lo tanto, una mayor proporción de agregados de mayor tamaño, incrementa el valor del diámetro medio ponderado (DMP), por lo que aquellos factores que favorecen la formación de agregados estables de mayor tamaño, inciden en el incremento del DMP. El DMP es un índice propuesto por Kemper Rosenau (1986) para valorar el grado de estabilidad de los agregados del suelo cuando se humedecen. Un bajo valor indica un menor grado de estabilidad, mientras que al incrementarse éste, la estabilidad estructural aumenta. Kushwaha *et al.* (2001) mencionaron que la retención de residuos orgánicos, por efecto del sistema de labranza, permite incrementar el DMP entre 71 - 98% más con respecto a un suelo donde no se permite el reciclaje de residuos orgánicos. Los cambios en la cantidad de C de la MOP son un indicador temprano del incremento en el C-orgánico de suelos manejados con compost y, puede ser un indicador del incremento en la estabilización de los macroagregados.

Mikha y Rice (2004) mencionaron que bajo sistemas de cero labranza (CL) el C-total aumenta, el C-lábil se asocia con los macroagregados, por lo que los agregados estables en agua aumentan. Oyedele *et al.* (1999) aludieron que en climas tropicales, las altas temperaturas, humedad y alternancias de estaciones secas y húmedas, ocasionan un deterioro rápido de la MOS, afectando negativamente las propiedades químicas, físicas y biológicas. Por ello, si el sistema de labranza es inadecuado, la MOS queda expuesta y se deteriora rápidamente al igual que la estructura. Thapa *et al.* (1999) señalaron que bajo las condiciones del clima trópicamente húmedo, la labranza es el primer factor de degradación, ya que bajo este ambiente es más factible que el suelo fértil sea removido a causa de la erosión hídrica. Igualmente, Whalen *et al.* (2003) manifestaron que el DMP se incrementa linealmente, con el incremento en las dosis de compost que se aplican al suelo.

De acuerdo con Bresson *et al.* (2001) la adición de compost al suelo representó un importante aporte de MOP, la cual permite incrementar la estabilidad de los agregados. Ellos consideraron que los materiales frescos permiten una redistribución del C-orgánico y una reformación de los agregados. Mientras que por otro lado, la disminución de MO por la degradación o transformación de los agregados, disminuye el DMP, lo que equivale a mencionar su tamaño. En este sentido, Bossuyt *et al.* (2004) señalaron que los macroagregados recientemente formados, contienen mayor riqueza de C que los microagregados. Esa es una de las razones por las cuales se explica, porque en aquellos suelos que recibieron dosis más altas de vermicompost, el C asociado es mayor.

Puget *et al.* (2000) encontraron que los macroagregados estables, son más ricos en C total, en particular en C orgánico joven y propusieron una composición esquemática de agregados en la cual, los macroagregados son formados por el enlace de microagregados a través de la materia orgánica joven, misma que está dominada por tejidos de plantas. La materia orgánica joven es responsable de la agregación y eventualmente, es redistribuida en diferentes clases de agregados después de la destrucción y reformación de los macroagregados. Según Matus (2003) cuando el C se

concentra en macroagregados (250 – 2000  $\mu\text{m}$ ) el C asociado puede ser temporal debido a que son menos estables que los microagregados.

Chenu *et al.* (2000) afirmaron que el contenido de C orgánico en niveles de 1 a 32 g kg<sup>-1</sup> de suelo, incrementa la agregación. La conclusión, basada en los resultados de la presente investigación, señala que la aplicación de vermicompost de cachaza y estiércol (1:1), en dosis de 40 a 60 t ha<sup>-1</sup>, permite incrementar la cantidad de C-orgánico, el cual favorece la formación de macroagregados estables y reduce la densidad aparente en seco. Debido a que hubo una mayor concentración de C en los agregados mayores a 0.25 mm y, además hubo una mayor proporción de esos mismos macroagregados, se concluyó que la mayor riqueza del suelo está en las fracciones consideradas como macroagregados. El hecho de que este C se haya asociado con los agregados entre 250 y 500  $\mu\text{m}$  representa una ventaja adicional, ya que estos agregados se consideran más estables que aquellos de tamaño superior y son más ricos en C que los microagregados, por lo que puede influir favorablemente la permanencia del C por más tiempo. La mayor estabilidad de los agregados se presentó en los suelos tratados con 40 - 60 t ha<sup>-1</sup> y que la formación de macroagregados estables, producto del efecto de la enmienda orgánica, trajo consigo un nuevo diseño estructural en la superficie del suelo. A través de las imágenes de las láminas delgadas, se observó un mayor número de macroagregados y mayor cantidad de poros. En los resultados se constató que la degradación de la materia orgánica suministrada vía aportes de vermicompost es intensa, por lo que después de un periodo de 18 meses no se observan fragmentos gruesos en la superficie de los macro y microagregados. Por el contrario, un recubrimiento amorfo en las superficies de los mismos es detectado y es el que aparentemente cumple con la función de mantener unidos los agregados que constituyen la estructura.

En el caso de agregados estables en agua, estadísticamente presentaron un efecto significativo en el uso del suelo. El contenido más alto de COS y sus fracciones lábiles de resistencia en los agregados estables al agua se caracterizó en el ecosistema forestal. Los siguientes contenidos más altos de carbono lábil se encontraron en el agroecosistema y en el ecosistema urbano y los más bajos. Sin embargo, los valores

más bajos fueron encontrados en el ecosistema de pradera. Caravaca *et al.* (2002) han descrito la mayor estabilidad de los agregados en la zona de la raíz, que es una confirmación de los resultados de Haynes y Beare (1997), quienes describieron la acción de la biomasa de las raíces e hifas de hongos. Esto es cierto, sin embargo, hay diferencias entre los pastos en estado natural y aquellas condiciones influenciadas por el hombre. Las actividades humanas modifican el ambiente del suelo y, en algunos casos, pueden conducir a una indirecta influencia en la estabilidad de los agregados del suelo. En el ecosistema urbano, la humedad del suelo fue más adecuada, lo que indica que las condiciones en el ecosistema urbano fueron mejores que los del ecosistema de pradera, donde la actividad microbiana disminuyó en períodos secos. Se ha informado de que una menor disponibilidad de nitrógeno (Daufresne y Loreau, 2001) o una mayor concentración de la solución del suelo durante un período seco puede causar una disminución en la actividad microbiana. Un mayor contenido de C y menores cambios suponen que más C se estabiliza en agregados, cuando está protegido contra oxidación (Balabane y Plante, 2004). Aunque los exudados de las raíces contribuyen a un mayor contenido de C, no todo el C se convierte en una parte de los agregados. Exudados radiculares son la fuente de C más fácilmente disponible para los microorganismos del suelo, y la mayor parte de los componentes de los exudados se descomponen antes de la incorporación en los agregados. Un cambio más significativo en el C también se observó en el agroecosistema que en el ecosistema urbano, pero esto probablemente se debió a la aplicación de estiércol de granja (Kalbitz *et al.*, 2003) o la incorporación de los residuos de cultivo (Morel *et al.*, 1991), que son fuentes de las formas lábiles de C.

En relación con los diversos tamaños de los agregados, un efecto estadísticamente significativo se presentó. De hecho, los agregados más grandes fueron los mayores en las sustancias orgánicas; esta observación estaba de acuerdo con los estudios de Jastrow (1996). El mayor contenido de C lábil se encontró en la fracción más pequeña de los agregados, lo que es consistente con los resultados de Bravo-Garza *et al.* (2010), quienes reportaron que un mayor contenido de materia orgánica particulada intra-agregado se encontró en agregados que eran más pequeños. Sin embargo, el C en estos agregados estuvo sujeto a menor cantidad de

cambios. Una explicación puede ser el hecho de que en esta fracción las sustancias orgánicas lábiles se convirtieron en los núcleos de los agregados, las cuales que están rodeadas por partículas minerales que pueden proteger físicamente las sustancias orgánicas inestables de la actividad de descomposición de los organismos del suelo. Según Santos *et al.* (1997), las placas de arcilla forman un revestimiento protector contra las colonia de bacterias, y esto podría inhibir la descomposición de la materia orgánica del suelo situada en el interior.

Una dependencia estadísticamente significativa entre fracciones de tamaño individual de los agregados tamizados en seco (3-5 mm y 0,5-1 mm) en los parámetros del C se observó lo siguiente. La correlación con la fracción de tamaño de 3-5 mm fue negativa, es decir, en el mayor contenido de COS (incluyendo su fracción lábil), el más pequeño contenido de agregados de esta fracción de tamaño. A la inversa, la fracción de agregado de 0,5-1 mm mostró una correlación positiva, lo cual indica que al presentarse el más alto contenido del SOC (incluyendo su lábil fracción), mayor es el contenido de esta fracción en los agregados en la suelo. En conjunto, esto indica que las sustancias orgánicas principalmente apoyan la formación de pequeños agregados tamizados en seco. En agregados más grandes, hay una mineralización superior de la materia orgánica (Jastrow, 1996), lo que resulta en el rompimiento de los agregados. Por lo tanto, el contenido de agregados más pequeños puede aumentar después del rompimiento de agregados más grandes. Mayores cambios en la materia orgánica del suelo en los agregados más grandes también se observó. La estabilidad de los agregados en seco puede cambiar inmediatamente con un aumento en la humedad del suelo (Attou y Bruand, 1998), lo que en parte puede compensar sólo la materia orgánica.

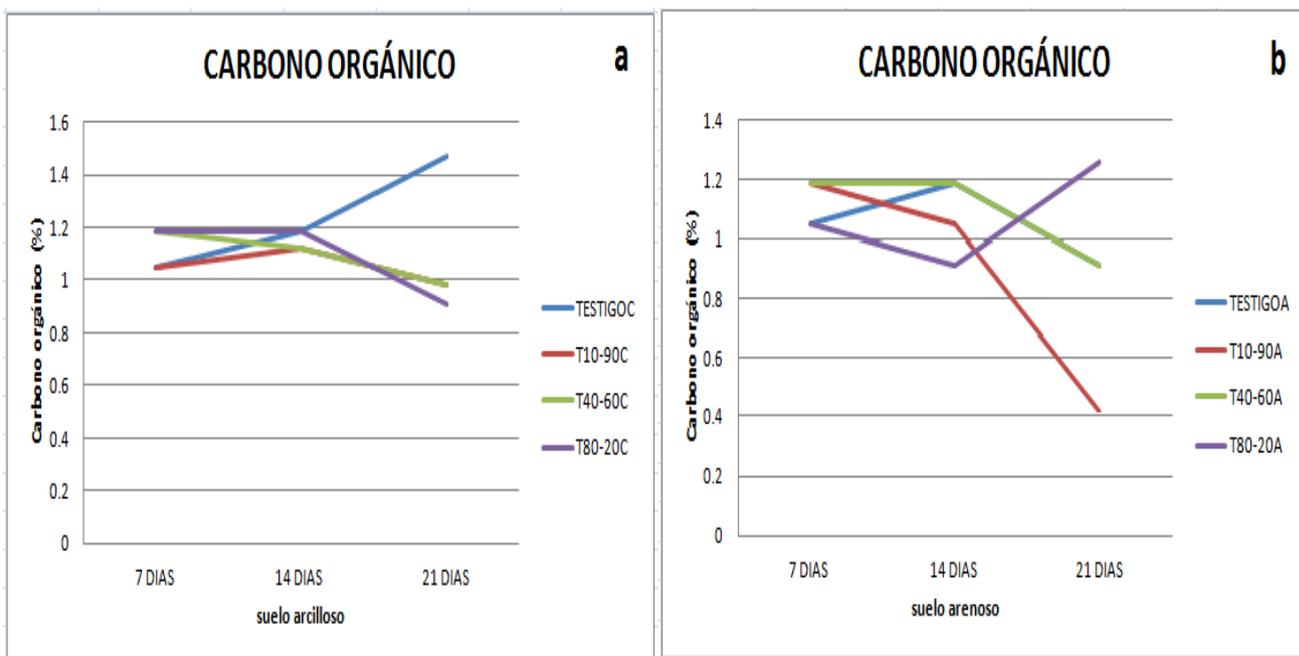
El tiempo de permanencia de la MOS varía por los procesos de descomposición a la que es sometida por la actividad de la biomasa microbiana, cuya intensidad depende de la composición bioquímica de la MOS, condiciones climáticas (Amelung *et al.*, 1999) y su interacción con la fracción mineral del suelo (Jenkinson, 1988), donde se propicia una reacción de adsorción en la fracción fina del suelo (partículas menores a 50 mm), quedando fuera del alcance de la biomasa microbiana (Van Veen y Kuikman,

1990). Esto ocasiona una menor tasa de mineralización de C y N (Juma, 1993), lo que pudiese explicar al menos parcialmente la diferencia en la capacidad de acumulación de MOS en suelos con diferente textura, aunque esto aún es motivo de controversia. Al respecto, algunos autores han obtenido relaciones altamente significativas entre la textura del suelo y la acumulación de la MOS o su tasa de mineralización fortaleciendo dicha hipótesis (Vejre *et al.*, 2003; Shahandeh *et al.*, 2005; Carneiro *et al.*, 2006;). De hecho, Leggett y Kelting (2006) señalan que además de la protección que ejerce la fracción fina del suelo sobre la MOS, los macroporos de los suelos arenosos crean un ambiente que conduce a una mayor oxidación de la MOS. En contraste, otros no han encontrado una relación clara entre la textura del suelo y la tasa de mineralización (Gregorich *et al.*, 1991; Scott *et al.*, 1996;) o la acumulación de MOS (Percival *et al.*, 2000). De acuerdo a Plante *et al.* (2006), la textura del suelo afecta de manera diferencial la distribución de la MOS, actuando de manera directa e indirecta sobre los distintos mecanismos con los que la MOS queda protegida contra la actividad de la biomasa microbiana, razón por la cual se propician resultados aparentemente contradictorios.

**Cuadro 13. Comportamiento del carbono orgánico de los tratamientos empleados a través de los muestreos realizados en suelo arcilloso y arenoso.**

Muestreo (días)/tratamientos*	Suelo arcilloso				Suelo arenoso			
	testigo	10-90	40-60	80-20	testigo	10-90	40-60	80-20
7	1.05	1.05	1.19	1.19	1.05	1.19	1.19	1.05
14	1.19	1.12	1.12	1.19	1.19	1.05	1.19	0.91
21	1.47	0.98	0.98	0.91	0.91	0.42	0.91	1.26

\*La primera cantidad corresponde al porcentaje de mucílago y la segunda al porcentaje de agua



**Figura 29. Comportamiento del carbono orgánico en los tratamientos empleados a través de tres muestreos en suelo arcilloso y arenoso.**

### 7.5.5. Nitrógeno total

Los resultados para el suelo arcilloso se muestran en el Cuadro 14, Figura 30a, mientras que para el suelo arenoso en el cuadro 14, figura 30b.

El Comportamiento del nitrógeno en el suelo de textura arcillosa, para el primer muestreo (Cuadro 14 y Figura 30a) fue de la siguiente manera: el mayor porcentaje correspondió al tratamiento con 80% de mucílago y 20% de agua con 0.15% y los tratamientos con 40% de mucílago y 60% de agua, con 10% de mucílago y 90% de agua y Testigo con los siguientes valores; 0.14, 0.9 y 0.13, respectivamente. Mientras, que para el segundo muestreo, también el mayor porcentaje fue para el tratamiento con 80% de mucílago y 20% de agua y los tratamientos con 40% de mucílago y 60% de agua, con 10% de mucílago y 90% de agua y Testigo con los siguientes valores; 0.14, 0.14 y 0.12, respectivamente. En el último muestreo, el mismo tratamiento (con 80% de mucílago y 20% de agua) volvió a presentar el porcentaje más alto, con 0.17% y los tratamientos con 40% de mucílago y 60% de agua, con 10% de mucílago y 90% de agua y Testigo con 0.14% para los tres tratamientos mencionados.

En el suelo de textura arenosa (Cuadro 14 y Figura 30b), el mayor porcentaje de nitrógeno correspondió al tratamiento con 40% de mucílago y 60% de agua con un valor de 0.14, siguiéndole en orden descendente los tratamientos con 10% de mucílago y 90% de agua, Testigo y con 80% de mucílago y 20% de agua, cuyos valores fueron; 0.13, 0.13 y 0.11, respectivamente. El segundo muestreo presentó los tratamientos con 10% de mucílago y 90% de agua y con 80% de mucílago y 20% de agua con los porcentajes más altos de 0.13 para ambos tratamientos, mientras que los tratamientos con 40% de mucílago y 60% de agua y testigo con valores de 0.11 y 0.10, respectivamente. Por último, en el tercer muestreo, el tratamiento con 10% de mucílago y 90% de agua con el porcentaje más alto, de 0.25, mientras que los tratamientos con 80% de mucílago y 20% de agua, con 40% de mucílago y 60% de agua y el testigo con los siguientes valores: 0.16, 0.13 y 0.13, respectivamente.

La absorción de compuestos orgánicos (nitrogenados) por minerales arcillosos los protege de la descomposición. Es conocido que el contenido de N de los suelos de textura fina es mayor que los suelos de textura gruesa y que arcillas del tipo montmorillonita reduce la tasa a la cual proteínas y otros compuestos nitrogenados son descompuestos por microorganismos (o por enzimas proteinazas). Tratamiento de los minerales del suelo con ácido fluorídrico para descomponer los minerales arcillosos resultan en la solubilización de N orgánico, lo cual indica que algo del N orgánico puede ser atrapado dentro de las entrelazadas estructuras de los minerales arcillosos.

Los complejos formados entre los compuestos orgánicos nitrogenados y los cationes polivalentes, tales como Fe, son biológicamente estables. Una explicación dada para la alta estabilidad de la materia orgánica en suelos alofánicos es que grupos reactivos de sustancias húmicas se combinaron al Aluminio amorfo de tal forma que no proveen un adecuado acceso para que las enzimas sean capaces de ser atacadas.

Algo de N orgánico se encuentra en poros pequeños y es físicamente inaccesible a los microorganismos. Las enzimas tienen potencialmente la capacidad de penetrar poros muy pequeños pero sus movimientos pueden ser restringidos a través de la absorción (Stevenson, 1982).

La materia orgánica tiene tanto un efecto directo como indirecto sobre la disponibilidad de nutrientes para el crecimiento vegetal. Para servir como fuente de N, P, y S a través de su mineralización por los microorganismos del suelo, la materia orgánica influye el aporte de nutrientes desde otras fuentes. Por ejemplo la materia orgánica se requiere como fuente de energía para la fijación bacteriana de N, por lo tanto la cantidad de N<sub>2</sub> molecular fijado por los fijadores libres será influenciada por la cantidad de energía disponible en la forma de carbohidratos (Stevenson, 1982).

En situaciones en las que las condiciones para la protección física de la materia orgánica no existen, las sustancias orgánicas estabilizadas en relación con la estabilidad de los agregados se vuelven más importantes. En este caso, una dependencia estadísticamente significativa sobre nitrógeno no lábil y diversos tamaños de fracciones de agregados fueron registrados. Nitrógeno no lábil está presente principalmente en sustancias húmicas, que desempeñan un papel importante en la formación de la estructura del suelo. Tarchitzky et al. (2000) han sugerido que la distribución de sustancias de húmicas, incluyendo ácidos húmicos y fúlvicos en los agregados, es un resultado más de los revestimientos originales de las partículas húmicas que de su acción en la unión de las partículas del suelo. En contraste, Piccolo *et al.* (1997) mostraron que los ácidos húmicos pueden estar adsorbidos sobre las partículas de arcilla por cationes polivalentes, lo que significa que bajo condiciones de contenido de carbonato más altas, también pueden estar incluidos dentro de los agregados.

Este es un resultado tanto de la composición química de los residuos de plantas (Martens, 2000) y la aplicación de abonos orgánicos, ya que, de acuerdo con Debosz *et al.* (2002), los hidratos de carbono de origen microbiano resisten mejor la degradación que los carbohidratos de origen vegetal. Esto puede explicar la mayor estabilidad de los agregados del suelo en los agroecosistemas, porque el estiércol de granja es una fuente de grandes cantidades de microorganismos.

La influencia de las sustancias orgánicas de origen vegetal sobre la estabilidad de los agregados del suelo es diferente también. Algunas de estas sustancias, tales como polisacáridos, actúan como componentes temporales para la producción de agregados (Tisdall y Oades, 1982; Kay, 1998), mientras que otros, tales como fenoles, polifenoles (Martens, 2000) y lignina (Magill y Aber, 1998), apoyan la formación de agregados más resistentes.

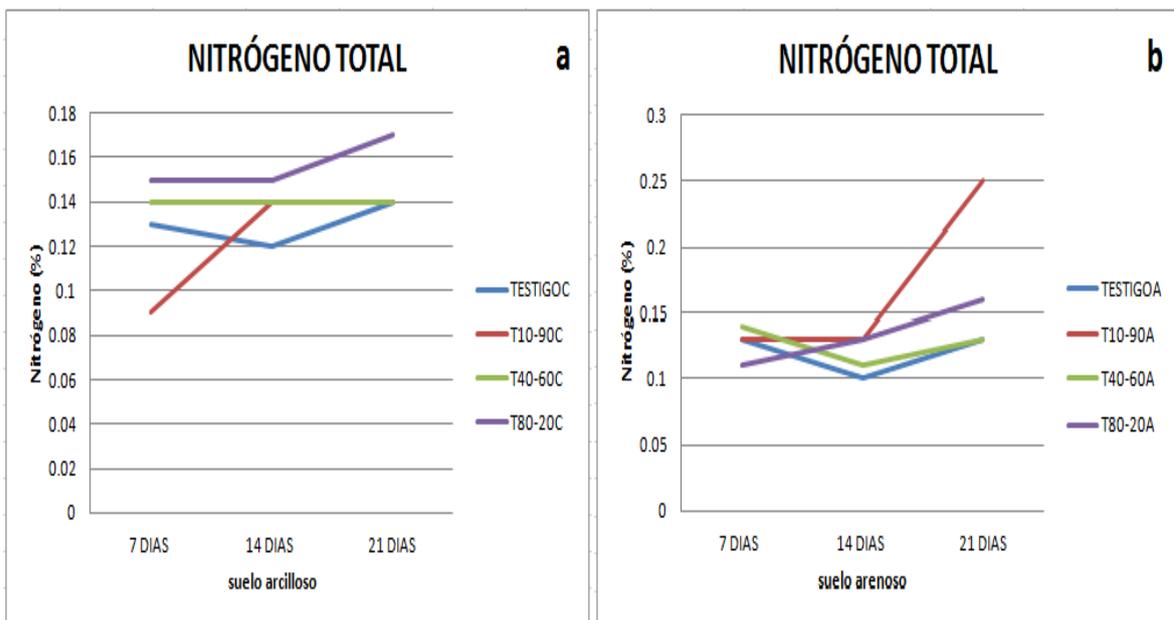
Sin embargo, el objetivo fue evaluar la estabilidad de los agregados en húmedo. La materia orgánica del suelo juega un papel muy importante en la estabilidad de los agregados resistentes al agua, como se indica por Cantón et al. (2009). En el presente estudio, una diferencia estadísticamente significativa del efecto de los parámetros del N se registró. El contenido de la fracción de 2-3 mm de agregados resistentes al agua mostró una correlación negativa con el contenido de N lábil, la labilidad de N y el índice labilidad del N, lo que sugiere que cuanto mayor sea el contenido de N lábil, existe una reducción en el contenido de fracciones de tamaño más grandes de agregados resistente al agua. Cuando las fracciones lábiles de la materia orgánica del suelo son físicamente protegidas (es decir, rodeada por las partículas de arcilla), la agregación puede continuar, pero si las fracciones lábiles están disponibles para los descomposición, los agregados se rompen (Bronick y Lal, 2005). En particular, el C lábil en suelos arados está más expuesto a la actividad microbiana (La Scala *et al.*, 2008). En general, la forma lábil de C y N contribuyen a la formación de agregados menos estables.

Los materiales orgánicos organizan y estabilizan los agregados del suelo (Tisdall y Oades, 1982; Oades y Waters, 1991) y los cambios en los agregados estables en agua son dependientes del tipo (composición bioquímica) de descomposición de los restos orgánicos. El Diámetro Medio Ponderado (DMP) calculado en base a la sumatoria de los pesos de las diferentes fracciones de agregados y comparado con el peso total del suelo. Los valores del DMP dan un resultado general de la agregación del suelo, pero proporciona poca información del impacto de los residuos orgánicos sobre la distribución de los diferentes tamaños de agregados.

**Cuadro 14. Comportamiento del nitrógeno total de los tratamientos empleados a través de los muestreos realizados en suelo arcilloso.**

Muestreo (días)/tratamientos*	Suelo arcilloso				Suelo arenoso			
	testigo	10-90	40-60	80-20	testigo	10-90	40-60	80-20
7	0.13	0.09	0.14	0.15	0.13	0.13	0.14	0.11
14	0.12	0.14	0.14	0.15	0.10	0.13	0.11	0.13
21	0.14	0.14	0.14	0.17	0.13	0.15	0.13	0.16

\*La primera cantidad corresponde al porcentaje de mucílago y la segunda al porcentaje de agua.



**Figura 30. Comportamiento del nitrógeno total en los tratamientos empleados a través de tres muestreos en suelo arcilloso y arenoso.**

### **7.5.6. Relación carbono/nitrógeno.**

Los resultados para el suelo arcilloso se muestran en el Cuadro 15, Figura 31a, mientras que para el suelo arenoso en el Cuadro 15, figura 31b.

Para el suelo arcilloso, los resultados del Cuadro 15 y Figura 31a mostraron que en el primer muestro realizado a los siete días, el mejor tratamiento fue el de 10% de mucílago y 90% de agua con una relación C/N de 11.66, seguido por el tratamiento con 40% de mucílago y 60% de agua, el testigo y por último el con 80% de mucílago y 20% de agua; con valores de C/N de 8.49, 8.08 y 7.93, respectivamente. Ahora, en el segundo muestreo realizado a los 14 días, la relación C/N más alta fue para el testigo, mientras que para los tratamientos con 10% de mucílago y 90% de agua, con 40% de mucílago y 60% de agua y con 80% de mucílago y 20% de agua sus valores fueron similares con una relación C/N de 7.99. Para el último muestreo, la mayor relación C/N siguió siendo para el Testigo, mientras que para los tratamientos con 10% de mucílago y 90% de agua, con 40% de mucílago y 60% de agua y con 80% de mucílago y 20% de agua sus valores disminuyeron a 7.00, 7.00 y 5.36, respectivamente. Puede observarse que la tendencia general es una disminución de la relación C/N en los tratamientos con las diferentes dosis de mucílago, con excepción de Testigo, que en los tres muestreos siempre mostró un incremento en dicha relación. Los resultados anteriores están relacionados con la textura y tipo de materia orgánica.

Algunos estudios han reportado una relación en la estabilización del carbono orgánico y nitrógeno en los suelos y el contenido de arcilla o limo más arcilla (Hassink, 1997). La estabilización del carbono orgánico en el suelo puede ser a través de tres vías; la estabilización física, se da por la formación de barreras físicas entre microorganismo, enzimas y exudados que controlan las interacciones de la red alimenticia y consecuentemente la proliferación de microorganismos (Elliott y Coleman, 1988). La estabilización química es el resultado de la unión química o físico-química entre el COS y los minerales del suelo (partículas de arcilla y limo) y la estabilización bioquímica, ésta es debida a la composición bioquímica del COS (compuestos recalcitrantes como lignina y polifenoles) a través de procesos químicos complejos (Christensen, 1996). Relacionado con lo anterior, el tipo de MOS está

estrechamente relacionada con los resultados anteriores, se han clasificado los agentes cementantes en tres grupos: transitorios, temporales y persistentes (Boix-Fayos, 2001). Los transitorios son materiales orgánicos, que se descomponen rápidamente por los microorganismos: el grupo más importante son los polisacáridos, el efecto de estos puede durar semanas.

El nivel de M.O. en los suelos es proporcional al contenido de nitrógeno (N). La relación C/N de la materia orgánica generalmente cae en el rango de 10 a 12, aunque valores mayores no son inusuales. Debido a la facilidad con que se realiza una determinación Kjeldhel el N es a menudo utilizado como una medida del contenido de M.O. (Stevenson, 1984).

La acción microbiana puede mineralizar o inmovilizar el nitrógeno. El principal factor que determina cuál de los dos procesos va a ocurrir es la relación carbono-nitrógeno (C:N). Los microorganismos utilizan el nitrógeno para construir sus propios materiales y como fuente energética. La cantidad de nitrógeno que necesita la población microbiana es proporcional a la cantidad de carbono que ingresa a él. Una relación C:N de alrededor de 32;1 constituye el punto de equilibrio para la descomposición de los materiales orgánicos en pocas semanas. Si la relación es mayor, parte del nitrógeno del suelo debe ser inmovilizado. Aunque el material orgánico añadido al suelo posea una relación C:N amplia, el nitrógeno eventualmente llega a mineralizarse, pero necesita un período de espera o latencia. Cuando mayor es la relación C:N más largo es el período de inmovilización neta. Cuanto menor es la relación C:N, antes se realiza la mineralización del nitrógeno (Stevenson, 1984).

El cambio de la relación C:N con el tiempo, puede utilizarse como guía para determinar el intervalo de tiempo más adecuado entre la incorporación al suelo de los residuos orgánicos y la plantación del siguiente cultivo. Debe evitarse la competencia por el nitrógeno entre los microorganismos y el cultivo, porque este último sufrirá deficiencia hasta que las necesidades de las primeras se vieran satisfechas. Cuando se teme la ocurrencia de tal competencia, es aconsejable aplicar algún fertilizante

nitrogenado para reducir la relación C:N y acortar el período de inmovilización (Stevenson, 1984).

La Figura 31b y el Cuadro 15 muestran que los valores de relación C/N para el suelo arenoso en el primer muestreo que se realizó a los siete días, se encuentran cercanos entre sí; La relación C/N de 9.54% fue la más alta y correspondió al tratamiento con 80% de mucílago y 20% de agua, seguida por los tratamientos con 10% de mucílago y 90% de agua, con 40% de mucílago y 60% de agua y testigo, con relaciones C/N de 9.15%, 8.49% y 8.08%, respectivamente. En el segundo muestreo que se realizó a los 14 días, tanto el testigo como el tratamiento con 40% de mucílago y 60% de agua incrementaron sus relaciones C/N con valores de 11.89% y 10.81%, respectivamente. Mientras que, los tratamientos con 10% de mucílago y 90% de agua y con 80% de mucílago y 20% de agua disminuyeron sus relaciones C/N. En el último muestreo se puede observar que la relación C/N para los cuatros tratamientos empleados disminuyó. Los valores de la relación C/N para los tratamientos con 80% de mucílago y 20% de agua, con 40% de mucílago y 60% de agua, con 10% de mucílago y 90% de agua y Testigo, fueron de: 7.87, 7.00, 1.67 y 7.00, respectivamente. La tendencia general de la relación C/N es una disminución en cada uno de los tratamientos utilizados en el experimento de suelo arenoso, lo cual puede estar relacionado con cantidad de mucílago de nopal aplicado en cada uno de los tratamientos y la textura del suelo, tal y como lo menciona Hassink (1996) que la agregación y la textura determinan indirectamente el nivel de carbono y nitrógeno retenidos en el suelo por suprimir la actividad biológica. Además, Schimel *et al.* (1994) y Oades (1988) hicieron mención que los suelos con alto contenido de arena, suelen presentar velocidades más altas de mineralización y niveles más bajos de carbono orgánico, porque los mecanismos de protección son reducidos o se encuentran ausentes. Aparte de la protección física del carbono orgánico del suelo que se da a través de la agregación, la cual reduce la accesibilidad de los microorganismos y enzimas a los compuestos orgánicos, también existe la protección química, dada por la formación de complejos órgano-mineral. Otros trabajos que han remarcado la importancia de la textura por afectar las cantidades de carbono orgánico del suelo y la retención de la materia orgánica en el suelo, se encuentran los siguientes:

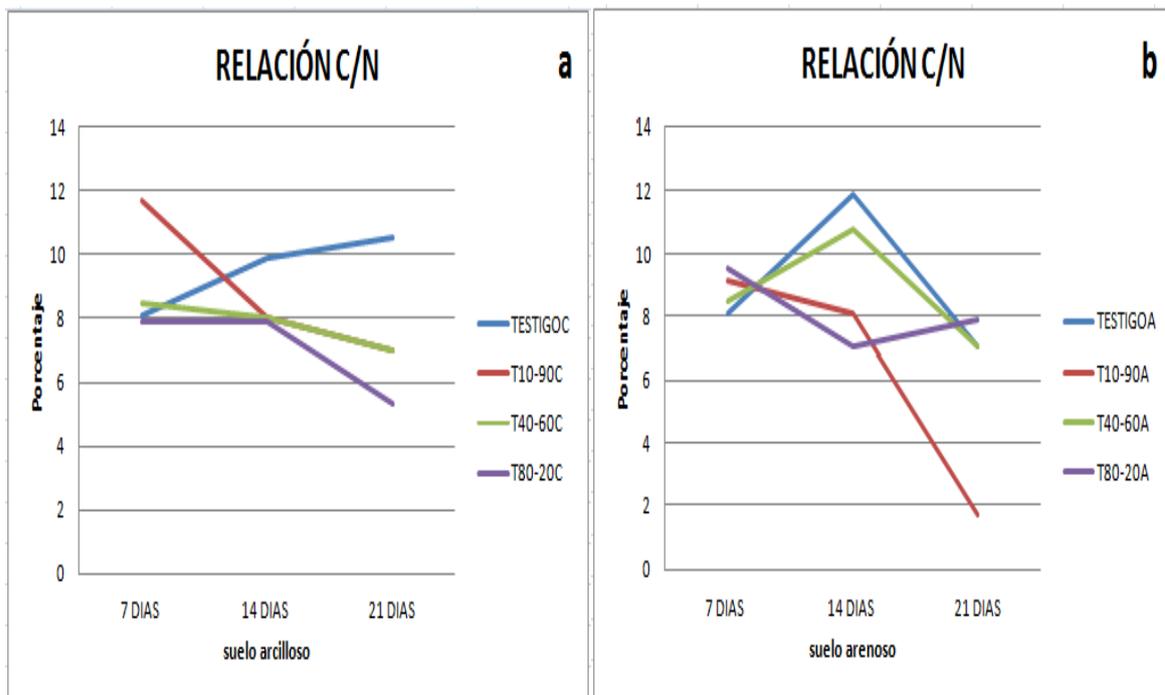
Correlaciones lineares fueron encontradas entre la textura del suelo y el carbono orgánico del suelo por Spain (1990) y Hassink (1994). Las diferencias en las velocidades de descomposición y cantidades de carbono orgánico del suelo en varios suelos texturizados han sido atribuidas a diferencias en la protección física del COS, por ejemplo: residuos de cultivos adicionados al suelo, se descomponen más rápidamente en suelos arenosos que en suelos arcillosos por lo tanto, en éstos últimos la protección es mayor (Sorensen, 1981, Ladd *et al.*, 1985). Jenkinson (1988) encontró que con el mismo ingreso de materiales orgánicos los suelos arenosos tienden a contener menos materia orgánica que suelos arcillosos.

El conocimiento de la dinámica de la materia orgánica del suelo (MOS) es esencial para entender el flujo del carbono (C) y nitrógeno (N) en el suelo. Estudios empíricos y modelos de simulación sugieren que las diferencias en cantidad y calidad de los aportes orgánicos al suelo dan las diferencias en el tamaño de los "pooles" orgánicos y las tasas de mineralización de C y N. Sin embargo, aún persisten dudas sobre el efecto de la textura sobre el reciclaje del C en el suelo. Es bien sabido que suelos arcillosos retienen más MOS que suelos arenosos, a pesar de haber sido sometidos al mismo aporte de materia orgánica (Jenkinson, 1988; Amato y Ladd, 1992; Hassink, 1994). Estas diferencias resultan de la mayor protección de la MOS contra la biodegradación (Van Veen y Kuikman, 1990). La protección ocurre cuando la MOS es adsorbida sobre la superficie de las partículas de arcilla y limo, o cuando es "incrustada" o recubierta por los minerales de arcilla (Tisdall y Oades, 1982; Golchin *et al.*, 1994) o cuando se localiza dentro de los micro-agregados, fuera del alcance de los microorganismos (Elliott y Coleman, 1988). Todos estos mecanismos afectan negativamente las tasas de mineralización de C y N (Ladd *et al.*, 1981, 1985; Amato y Ladd, 1992; Juma, 1993; Ladd *et al.*, 1993; Skjemstad *et al.*, 1993).

**Cuadro 15. Comportamiento de la relación C/N de los tratamientos empleados a través de los muestreos realizados en suelo arcilloso.**

Muestreo (días)/tratamientos *	Suelo arcilloso				Suelo arenoso			
	testigo	10-90	40-60	80-20	testigo	10-90	40-60	80-20
7	8.08	11.66	8.49	7.93	8.08	9.15	8.49	9.54
14	9.91	7.99	7.99	7.93	11.89	8.08	10.81	7.00
21	10.52	7.00	7.00	5.36	7.00	1.67	7.00	7.87

\*La primera cantidad corresponde al porcentaje de mucílago y la segunda al porcentaje de agua.



**Figura 31. Comportamiento de la relación carbono/ nitrógeno en los tratamientos empleados a través de tres muestreos en suelo arcilloso y arenoso.**

## **7.6. CONCLUSIONES**

### **Suelo arcilloso**

El tratamiento con 80% de mucílago y 20% de agua, presentó los valores más altos en la estabilidad de los agregados, en los tamaños; >4.76, 3.36, 2.0, 1.0 y 0.5 mm. De igual manera, el tratamiento con 40% de mucílago y 60% de agua en los tamaños de agregados >4.76, 1.0 y 0.5 y 0.25 mm. Mientras, que el tratamiento con 10% de mucílago y 90% de agua solamente en el tamaño 0.5 mm. Asimismo, tenemos que del primer muestreo al tercero, la estabilidad de los agregados disminuye. Además, se presenta la tendencia de que a mayor tamaño de agregados, menos estabilidad estructural. Para estabilidad estructural y contenido de carbono orgánico el mejor tratamiento fue con 80% de mucílago y 20% de agua. Mientras, que el testigo solamente en el contenido de carbono orgánico. En cuanto al contenido de nitrógeno total, el tratamiento con 80% de mucílago y 20% de agua presentó los valores más altos en los tres muestreos realizados. Por último en la relación C/N, el mejor tratamiento fue el testigo.

### **Suelo arenoso**

Para el suelo arenoso en la estabilidad de agregados, el tratamiento con 40% de mucílago y 60% de agua con los valores más altos en agregados >4.76, 3.36, 2.0, 1.0, 0.5 y 0.25. Seguido por el tratamiento con 80% de mucílago y 20% de agua en tamaño de agregados >4.76, 3.36, 2.0, 1.0, 0.5. Por último, el tratamiento con 10% de mucílago y 90% de agua con el más alto solamente en el agregado >4.76. Se presenta la misma tendencia que en el suelo con textura arcillosa, a mayor tamaño de agregado menor estabilidad y viceversa a menor tamaño de agregado más estabilidad. En las propiedades estabilidad estructural y contenido de carbono orgánico el mejor tratamiento fue el de 40% de mucílago y 60% de agua. En cuanto al contenido de nitrógeno total, el mejor tratamiento fue el de 10% de mucílago y 90% de agua, mientras que para la relación carbono/nitrógeno fue el tratamiento con 80% de mucílago y 20% de agua.

## 7.7. BIBLIOGRAFÍA

- Amato, M. and Ladd, J. N. 1992.** Decomposition of  $^{14}\text{C}$ -labelled glucose and legume material in soils: Properties influencing the accumulation of organic residue C and microbial biomass C. *Soil Biol. Biochem.* 24:455-464.
- Amelung, W.; Flach, K. W.; Zech, W. 1999.** Lignin in particle-size fractions of native grassland soils as influenced by climate. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63: 1222-1228.
- Aoyama, M., Angers, D. A, N'Dayegamiye, A. Bissonnette, N.1999.** Particulate and mineral-associated organic-matter in water-stable aggregates as affected by mineral fertilizer and manure applications. *Can. J. Soil Sci.* 79:295-302.
- Attou, F., Bruand, A. 1998.** Experimental study of fragipans, formation in soils. Role of both clay dispersion and wetting-drying cycles. *C.R. Acad. Sci. Ser. 2, Fascicule II. Sci. Terre Planetes* 326, 545–552.
- Balabane, M., Plante, A. F. 2004.** Aggregation and carbon storage in silty soil using physical fractionation techniques. *Eur. J. Soil Sci.* 55, 415–427.
- Balcke, G. U., Kulikova, N. A., Hesse, S., Koponke, F. D, Perminova, I. V. Frimmel, F. H. 2002.** Adsorption of humic Substances onto Kaolin .Clay Related to Their Structural Features. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66: 1805-1812.
- Bernoux, M., Cerri, C. C., Neill, C. De Moraes, J. F. L. 1998.** The use of stable carbon isotopes for estimating soil organic matter turnover rates. *Geoderma* 82: 43-58.
- Blair, J. G, Blair N., Lefroy, R. D. B., Conteh, A. Daniel, H. 1997.** Relationships between  $\text{KMnO}_4$  oxidizable C and soil aggregate stability and the derivation of a carbon management index. En: Drozd J, Gonet SS, Senesi N, Weber J (eds) *The role of humic substances in the ecosystems and environmental protection.* Polish Society of humic substances. Wroclaw. 227-232.
- Bossuyt, H., Six, J. Hendrix, P. F. 2004.** Rapid incorporation of carbon from fresh residues into newly formed stable microaggregates within earthworm casts. *Eu. J. Soil Sci.* 55 (2): 393-401.
- Bravo-Garza, M. R., Voroney, P., Bryan, R. B. 2010.** Particulate organic matter in water stable aggregates formed after the addition of  $^{14}\text{C}$ -labeled maize residues and wetting and drying cycles in vertisols. *Soil Biol. Biochem.* 42, 953–959.
- Bresson, L. M., Coch, C., Le Bissonais, Y., Barruso, E. Lecomte, V. 2001.** Soil surface structure by municipal waste compost application. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65: 1804-1811.
- Buyanovsky G.A., Aslam M., Wagner G.H., 1994.** Carbon turnover in soil physical fractions. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58, 1167-1173.
- Campbell, C. A., A. P. Moulin, D. Curtin, G. P. Lafond y 1. Townley Cantón, Y., Sole-Benet, A., Asensio, C., Chamizo, S., Puigdefabregas, J. 2009.** Aggregate stability in range sandy loam soils. Relationships with runoff and erosion. *Catena* 77, 192–199.
- Caravaca, F., A. Lax y J. Albaladejo. 2004.** Aggregate stability and carbon characteristics of particle size fractions in cultivated and forested soils of semiarid Spain. *Soil & Tillage Res.* 78: 83-90.
- Caravaca, F., Hernandez, T., Garcia, C., Roldan, A. 2002.** Improvement of rhizosphere aggregate stability of afforested semiarid plant species subjected to mycorrhizal inoculation and compost addition. *Geoderma* 108, 133–144.

- Caravaca, F., Hernandez, T., Garcia, C., Roldan, A. 2002.** Improvement of rhizosphere aggregate stability of afforested semiarid plant species subjected to mycorrhizal inoculation and compost addition. *Geoderma* 108, 133–144.
- Caravaca, F., Lax, A. Albaladejo, J. 2001.** Soil aggregate stability and organic matter in clay and fine silt fractions in urban refuse-amended semiarid soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65, 1235–1238.
- Carneiro, A. T. J.; Bayer, C.; Conceição, P. C.; Spagnollo, E.; Carnelli, J. y Guarinini, C. 1976.** Caracterización de suelos basálticos, segunda contribución. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay, Facultad de Agronomía, 1976. 32 p.
- Caron, J., Reid, E. and Trepanier, L. 1998.** Pression interne et éclatement suite à l'humectation: Influence des antécédents culturaux. Proc. 16th World Congress of Soil Science, Montpellier, France. 1998 Aug. 20\_26. International Society of Soil Science, Montpellier, France.
- Carter, M. R. (Ed.). 2004.** Researching structural complexity in agricultural soils. Review Special Issue. *Soil and Tillage Res.* 79:1-6.
- Chaney, K., Swift, R. S., 1984.** The influence of organic matter on aggregate stability in some British soils. *Journal of Soil Science* 35, 223-230.
- Chenu, C., Y. Le Bissonnais y D. Arrouays. 2000.** Organic matter influence on clay wetter influence on clay wettability and soil aggregate stability. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64: 1479-1486.
- Cheshire, M. V., Mundie, C. M. and Shepherd, H. 1979a.** Transformation of carbohydrate constituents of grass during decomposition in soil. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 30, 330.
- Christensen, B. T. 1992.** Physical fractionation of soil and organic matter in primary particle size and density separates. *Adv. Soil. Sci.* 20: 1-89.
- Concaret, J. 1967b.** Étude des mécanismes de la destruction des agrégats de terre au contact des solutions aqueuses. *Ann. Agron.* 18: 90\_144.
- Cosentino, D., Chenu, C. and Le Bissonnais, Y. 2006.** Aggregate stability and microbial community dynamics under drying-wetting cycles in a silt loam soil. *Soil Biol. Biochem.* 38: 2053-2062.
- Costa de campos, B.; Da Veiga, M. 2006.** Potential of carbon accumulation in no-till soils with intensive use and cover crops in southern Brazil. *J. Environ. Qual.* 35: 1599-1607.
- Daufresne, T., Loreau, M., 2001.** Ecological stoichiometry, primary producer decomposer
- Debosz, K., Peterson, S. O., Kure, L. K., Ambus, P. 2002.** Evaluating effects on sewage sludge and household compost on soil physical, chemical and microbiological properties. *Appl. Soil Ecol.* 19, 237–248.
- Elliott, E. T. and Coleman, D. C. 1988.** Let the soil work for us. *Ecological Bulletins* 39:23-32.
- Espinoza, Y. 2003.** Potencialidad de suelos tropicales para almacenar fracciones lábiles de Carbono. Seminarios CENIAP. Subproyecto INIA 601-4003-005. INIA-CENIAP-Biología de suelos. <http://www.ceniap.gob.ve/seminarios/yespinoza.htm>.
- Follett, R.F., Stewart, B.A., 1985.** Soil Erosion and Crop Productivity. American Society of Agronomy. Madison, Wisconsin, USA. 1985; p. 533.

- Franzleubbers AJ (2009)** Linking soil organic carbon and environmental quality through conservation tillage and residue management. In: Lal R, Follett RF (eds) Soil carbon sequestration and the greenhouse effect, Soil Science Society of America Special Publication 57, 2nd edn. Soil Science Society of America, Wisconsin, pp 263–289
- Franzluebbers, A. J. 2002.** Water infiltration and soil structure related to organic matter and its stratification with depth. *Soil Tillage Res.* 66: 197-205.
- Golchin, A.; Oades, J. M.; Skjemstad, J. O. and Clarke, P. 1994.** Soil structure and carbon cycling. *Aust. J. Soil Res.* 32:1043-1068.
- Graham, M. H., R. J. Haynes y J. H. Meyer. 2002.** Changes in soil chemistry and aggregate stability induced by fertilizer applications, burning and trash retention on a long-term sugarcane experiment in South Africa. *European Journal of Soil Sci.* 53: 589-598.
- Grandy, A. S., Gregory, A. P. Erichb, M. S. 2002.** Organic amendment and rotation crop effects on the recovery of soil organic matter and aggregation in potato cropping systems. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66: 1311-1319.
- Greene RSB, Tongway DJ (1989)** The significance of (surface) physical and chemical properties in determining soil surface condition of red earths in rangelands. *Aust J Soil Res* 27:213–225
- Gregorich, E. G.; Voroney, R. P.; Kachanoski, R. G. 1991.** Turnover of carbon through the microbial biomass in soil with different textures. *Soil Biol. Biochem.* 23: 799-805.
- Hassink, J. 1994.** Effects of soil texture and grassland management on soil organic C and N and rates of C and N mineralization. *Soil Biol. Biochem.* 26: 1221-1231.
- Hassink, J. 1996.** Preservation of plant residues in soils differing in insaturated protective capacity. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 60, 487-491.
- Hassink, J.; Matus, F. J.; Chenu, C. and Dalenberg, J. 1997.** Interaction between soil biota, soil organic matter and soil structure. *In: Brussaard, L. and Ferrera-Cerrato, R. (Eds.). Soil Ecology in Sustainable Agricultural Systems.* New York, USA. Lewis Publishers. p. 15-35.
- Haynes, R. J., Beare, M. H. 1997.** Influence of six crop species on aggregate stability and some labile organic matter fractions. *Soil Biol. Biochem.* 29, 647–653.
- Huang, P. M. 2004.** Soil mineral-organic matter-microorganism interactions: fundamentals and impacts. 82: 391-472 *En: D. Sparks (Ed.). Advances in Agronomy* Academic Press. New York.
- Jastrow, J.D., 1996.** Soil aggregate formation and the accrual of particulate and mineral- associated organic matter. *Soil Biol. Biochem.* 28, 665–676.
- Jenkinson, D. S. 1988.** Soil organic matter and its dynamic. In: Wild, A. (Ed.), *Soil Condition and interactions, and ecological persistence.* *Ecology* 82, 3069–3082.
- Jenkinson, D. S. 1988.** Soil organic matter and its dynamics. *In: Wild, A. (Ed.). Russel's soil conditions and plant growth.* 11th ed. Longman. New York, USA. p. 564-607.
- Juma, N. G. 1993.** Interrelationships between soil structure/texture, soil biota/soil organic matter and crop production. *Geoderma* 57:3-30.

- Kalbitz, K., Schmerwitz, J., Schwesig, D., Matzner, E. 2003.** Biodegradation of soil derived dissolved organic matter as related to its properties. *Geoderma* 113, 273–291.
- Kay, B. D. 1997.** Soil structure and organic carbon: a review p. 169-197. *En: R. Lal, J. M. Kimble. R. F. Follet, B. A. Stewart (Eds.). Soil Processes in the Carbon Cycle.* CRC. Press. New York.
- Kay, B. D. and Angers, D. A. 1999.** Soil structure. Pages A229-A276 in M. E. Sumner, ed. *Handbook of soil science.* CRC Press, Boca Raton, FL.
- Kay, B. D., 1998.** Soil structure and organic carbon: a review. In: Lal, R., et al. (Eds.), *Soil Processes and the Carbon Cycle.* CRC Press, pp. 169–197.
- Kemper, W. Rosenau, C. 1986.** Aggregate stability and size distribution. *En: Klute A (ed) Methods of soil analysis. Part 1. Agronomy 9. Physical and mineralogical methods. Second edition. ASA, SSSA. Madison 425-442.*
- Kong, A. Y. Y, Six, J., Bryant, D. C., Ford Denison, R. van Kessel, C. 2005.** The Relationship between Carbon Input, Aggregation, and Soil Organic Carbon Stabilization in Sustainable Cropping Systems. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 69: 1078-1085.
- Kong, A. Y. Y., Six, J., Bryant, D. C., Denison, R. F. and van Kessel, C. 2005.** The Relationship between carbon input, aggregation, and soil organic carbon stabilization in sustainable cropping systems. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 69: 1078-1085.
- Kushwaha, C. P., Tripathi, S. K. Singh, K. P. 2001.** Soil organic matter and water-stable aggregates under different tillage and residue conditions in a tropical dryland agroecosystem. *Applied Soil Ecology* 16: 229-241.
- La Scala Jr., N., Lopes, A., Spokas, K., Bolonhezi, D., Archer, D.W., Reicosky, D.C. 2008.** Short-term temporal changes of soil carbon losses after tillage described by a first-order decay model. *Soil Till. Res.* 99, 108–118.
- Ladd, J. N., M. Amato, J. M. A. Oades. 1985.** Decomposition of plant material in Australian soils. III. Residual organic and microbial biomass C and N from isotope-labelled legume material and soil organic matter, decomposing under field condition. *Aust. J. Res.* 23, 603-611.
- Ladd, J. N., R G. Foster, P. Nannipieri y J. M. Oades. 1996.** Soil structure and biological activity. p. 23-78. *En: G. Stotzky y J. M. Bollag (Eds.). Soil Biochemistry 9.* Marcel Dekker. New York.
- Ladd, J. N.; Amato, M. and Oades, J. M. 1985.** Decomposition of plant material in Australian soil III. Residual organic and microbial biomass C and N from isotope-labelled legume material and soil organic matter, decomposing under field condition. *Aust. J. Soil. Res.* 22: 331-341.
- Ladd, J. N.; Foster, R. C. and Skjemstad, J. O. 1993.** Soil structure: Carbon and nitrogen metabolism. *Geoderma* 56:401-434.
- Ladd, J. N.; Oades, J. M. and Amato, M. 1981.** Microbial biomass formed from <sup>14</sup>C- and <sup>15</sup>N-labelled plant material decomposing in soil in the field. *Soil Biol. Biochem.* 13: 119-126.
- Lal R, Follett RF, Stewart BA, Kimble JM (2007)** Soil carbon sequestration to mitigate climate change and advance food security. *Soil Sci* 172:943–956.

- Le Bissonnais, Y. and Arrouays, D. 1997.** Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility. II. Application to humic loamy soils with various organic carbon contents. *Eur. J. Soil Sci.* 48: 39-48.
- Leggett, Z. H.; Kelting, D. L. 2006.** Fertilization effects on carbon pools in loblolly pine plantations on two upland sites. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70: 279-286.
- Lichtfouse E (1997).** Heterogeneous turnover of molecular organic substances from crop soils as revealed by <sup>13</sup>C labeling at natural abundance with *Zea mays*. *Naturwissenschaften* 84:22–23. doi: 10.1007/s001140050342.
- Lomelí, V. G. 1996.** Cambios antropogénicos de los vertisoles de la cuenca del arroyo UCUM, Quintana, Roo. Tesis de maestría. Colegio de Postgraduados, Montecillo, México. 228 p.
- Lupwayi, N. Z., Arshad, M. A., Rice, W. A. Clayton, G. W. 2001.** Bacterial diversity in water-stable aggregates of soil under conventional and zero tillage management. *Appl. Soil. Ecol.* 16: 251-261.
- Magill, A. H., Aber, J. D. 1998.** Long-term effects of experimental nitrogen additions
- Martens, D. A. 2000.** Relationship between plant phenolic acids released during soil mineralization and aggregate stabilization. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66: 1857-1887.
- Martens, D. A. 2000.** Management and crop residue influence soil aggregate stability. *J. Environ. Qual.* 29: 723-727.
- Martí, c., J. Badia y M. A. Buesa. 2001.** Determinación de la estabilidad estructural de suelos del Alto Aragón por tamizado en húmedo y lluvia simulada *Edafología, Sociedad Española de la Ciencia del suelo vol. 8-2:21-30.*
- Matus, F. 2003.** Enrichment of carbon in particles-size separates of soils with different land-use management. *Revista de la ciencia del suelo y nutrición vegetal* 3 (1): 29-36.
- Matus, F.J. and Rodriguez, J. 1994.** A simple model for estimating the contribution of nitrogen mineralization to the nitrogen supply of crops from a stabilized pool of soil organic matter and recent organic input. *Plant and Soil* 162: 259-271.
- Mikha, M. M. Rice, C. W. 2004.** Tillage and manure effects on soil and aggregate-associated carbon and nitrogen. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68: 809-816.
- Morel, J. L., Habib, L., Plantureux, S., Guckert, A. 1991.** Influence of maize root mucilage on soil.
- Nuttall, W.F., Bowrcn, KE., and Campbell C.A. 1986.** Crop residue management practices, and N and P fertilizer effects on crop response and on some physical and chemical properties of a black chernozem over 25 years in a continuous wheat rotation. *Can. J. Soil Sci.* 66: 159-171.
- Oades JM, Waters AG (1991)** Aggregate hierarchy in soils. *Aust J Soil Res* 29:815–828
- Oades, J. M. 1988.** The retention of organic matter in soils. *Biogeochemistry* 5: 35-70. on foliar decay and humus formation in forest ecosystems. *Plant Soil* 203, 301–311.
- Ortiz, V. B. y Ortíz, S. C. A. 2001.** *Edafología.* Universidad autónoma Chapingo, Chapingo, Texcoco, México. 394 p.
- Oyedele, D. J., Schjonning, P., Sibbesen, E. Debosz, K. 1999.** Aggregation and organic matter fractions of three Nigerian soils as affected by soil disturbance and incorporation of plant material. *Soil tillage Research* 50 (20): 105-114.

- Pazos, J. 1981.** Identificación de los minerales arcillosos de los suelos utilizados en un ensayo de dinámica de potasio. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay, Facultad de Agronomía, 1981. 77 p.
- Percival, H. J.; Parfitt, R. L.; Scott, N. A. 2000.** Factors controlling soil carbon levels in New Zealand grasslands: is clay content important? *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64: 1623-1630.
- Piccolo, A., Pietramellara, G., Mbagwu, J. S. C. 1997.** Use of humic substances as soil conditioners to increase aggregate stability. *Geoderma* 91, 311–326.
- Piccolo, G. A., R. A. Rosell y J. A. Galantini. 1997.** Estabilidad de los agregados de un suelo rojo laterítico virgen y cultivado. Misiones, Argentina. INTA, Estación Experimental Agropecuaria Cerro Azul, Argentina. 16 pp.
- Plante, F. A.; Conant, R. T.; Stewart, C. E.; Paustian, K.; Six, J. Porta-Casanellas, J., M. López-Acevedo Regurín y C. Roquera de Laburu. 1999.** Edafología para la agricultura y el medio ambiente. 2ª edición. Mundi-Prensa. Madrid. 849 pp.
- Puget P, Chenu C, Balensdent J (2000)** Dynamics of soil organic matter associated with particle-size fractions of water-stable aggregates. *Eu. J. Soil Sci.* 51 (4): 595-601.
- Quirk, J. P. and Williams, G. B. 1974.** The disposition of organic materials in relation to stable aggregation. Pages 165-173 in A. D. Voronin, et al., eds. *Trans. Int. Congr. Soil Science. 10th. Inst. Pochvovedeniya y Agrokhimii, Moscow, Russia.*
- Rice CW (2002).** Organic matter and nutrient dynamics. In: Lal R (ed) *The encyclopedia of soil science.* Marcel Dekker, New York, pp 925–928
- Rothon, F.E., 2000.** Influence of Time on Soil Response to No-Till Practices. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64, 700–709.
- Saag, L.M.K., G.R., Sanderson, P., Moyna, and G., Ramos. 1975.** *Cactaceae mucilage* composition. *J. Sci. Food Agric.* 26:993-1000.
- Santos, D., Murphy, S. L. S., Taubner, H., Smucker, A. J. M., Horn, R. 1997.** Uniform separation of concentric surface layers from soil aggregates. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61, 720–724.
- Schimel, D. S., B. H. Braswell, E. A. Holland, R. Mckeown, D. S. Ojima, T. H. Painter, W.J. Parton, and A. R. Townsend. 1994.** Climatic, edaphic, and biotic controls over storage and turnover of carbon in soils. *Global Biogeochem. Cycles* 8, 279-293.
- Scott, N. A.; Cole, C.; Elliott, E. T.; Huffman, S. 1996.** Soil textural control on decomposition and soil organic matter dynamics. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 60: 1102-1109.
- Shahandeh, H; Wright, A. L.; Hons, F. M.; Lascano, R. J. 2005.** Spatial and temporal variation of soil nitrogen parameters related to soil texture and corn yield. *Agron. J.* 97: 772-782.
- Six J, Elliot ET, Paustin K (2000)** Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: a mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture. *Soil Biol Biochem* 32:2099–2103
- Six, J., E. T. Elliot y K. Paustian. 2000b.** Soil structure and soil organic matter: a normalized stability index and the effect of mineralogy. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64:1042-1049.

- Six, J., Elliott E.T., Paustian K., 2000.** Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: a mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture. *Soil Biol. Biochem.*, 32, 2099-2103.
- Six, J., Elliott, E. T., Paustian, K. 1999.** Aggregate and soil organic matter dynamics under conventional and no-tillage systems. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63:1350-1358.
- Skjemstad, J.O.; Janik, L. J.; Head, M. J. and McClure, S. G. 1993.** High energy ultraviolet photo-oxidation: a novel technique for studying physically protected organic matter in clay and silt-sized aggregates. *J. of Soil Sci.* 44:485-499.
- Smith. 1993a.** Soil aggregation as influenced by cultural practices in Saskatchewan: I. Black Chernozem soils. *Can. J. Soil Sci.* 73: 579-595.
- Sorensen, L. H. 1981.** Carbo-nitrogen relationships during the humification of celulosa in soils containing differnts amounts of clay. *Soil Biol. Biochem.* 13, 313-321.
- Spain, A. 1990.** Influence of environmental conditions and some soil chemical properties on the carbón and nitrogen contents of some tropical Australian rainforest soils. *Aust. J. Soil Res.* 28, 823-839.
- Steverson, F. 1982.** Humus chemistry: génesis, composition, reactions. New York: Wiley. 1982. 442 p.
- Sun, H., Larney, F. J, Bullock, M. S. 1995.** Soil amendents and water-stable aggregation of a desurfaced Dark Brown Chernozem. *Can. J. Soil Sci.* 75:319-325.
- Sustaita, R. F. 1998.** Efecto del uso agrícola en la estructura y propiedades físicas de dos unidades de suelo en una región semiárida. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México.
- Swift, R. S. 2001.** Sequestration of carbon by soil. *Soil Science* 166: 858-971.
- Tarchitzky, J., Hatcher, P.G., Chen, Y. 2000.** Properties and distribution of humic substances and inorganic structure-stabilizing components in particle-size fractions of cultivated Mediterranean soils. *Soil Sci.* 165, 328-342.
- Thapa, B. B., Cassel, D. K. Garrity, D. P. 1999.** Ridge tillage and contour natural grass barrier strips reduce tillage erosion. *Soil & Tillage Research* 55: 341-356.
- Tisdall, J. M. and J. M. Oades. 1982.** Organic matter and water-stable aggregates in soils. *J. Soil Sci.* 33: 141-163.
- Tisdall, J. M. and Oades, J. M. 1982.** Organic matter and water-stable aggregates in soils. *J. Soil. Sci.* 33: 141-163.
- Van Veen, J. A. and Kuikman, P. J. 1990.** Soil structural aspects of decomposition of organic matter by micro-organisms. *Biogeochemistry* 11: 213-233.
- Van Veen, J. A.; Kuikman, P. J. 1990.** Soil structural aspects of decomposition of organic matter by microorganisms. *Biogeochemistry* 11: 213-233.
- Vejre, H.; Callesen, I.; Vesterdal, L.; Raulund-Rasmussen, K.**
- Wallis, M. G. and Horne, D. J. 1992.** Soil water repellency. Pages 91-146 in B. A. Stewart, ed. *Advances in soil science*. Vol. 20. Springer Verlag, Berlin, Germany.
- Whalen, J. K, Hu. Q. Liu, A. 2003.** Compost applications increase water-stable aggregates in conventional and no-tillage systems. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 67: 1842-1847.
- Wallace, A., 1986.** A polysaccharide (guar) as a soil conditioner. *Soil Sci.* 141:371-373.