

**UNIVERSIDAD AUTONOMA AGRARIA  
“ANTONIO NARRO”**

**DIVISION DE INGENIERIA**

**DEPARAMENTO DE RIEGO Y DRENAJE**



**Efectividad de Ácidos Húmicos de Leonardita y Dos Bacterias en la Estabilidad de  
Agregados un Suelo Limo-Arcilloso**

**POR:**

**PABLO ARELLANOS RAMOS**

**TESIS**

**Presentada como Requisito Parcial para Obtener el Título de:**

**INGENIERO AGRONOMO EN IRRIGACION**

**Buenavista, Saltillo, Coahuila Méx.  
Mayo del 2010**

UNIVERSIDAD AUTONOMA AGRARIA  
"ANTONIO NARRO"

DIVISION DE INGENIERIA  
DEPARAMENTO DE RIEGO Y DRENAJE

Efectividad de Ácidos Húmicos de Leonardita y Dos Bacterias en la Estabilidad de  
Agregados de un Suelo Limo - Arcilloso

Por:

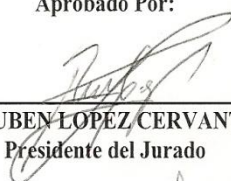
PABLO ARELLANOS RAMOS

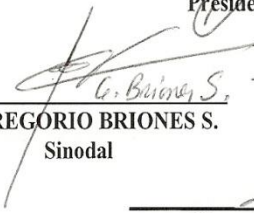
Tesis


Que somete a consideración del H. Jurado Examinador como requisito parcial para  
obtener el título de:

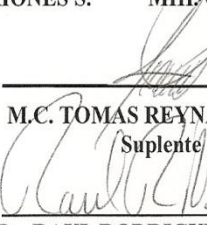
INGENIERO AGRONOMO EN IRRIGACION

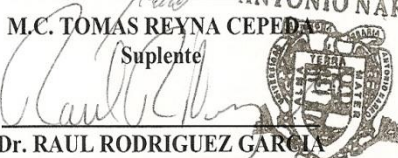
Aprobado Por:

  
Dr. RUBEN LOPEZ CERVANTES  
Presidente del Jurado

  
MC. GREGORIO BRIONES S.  
Sinodal

  
MIH. OSCAR LEMUS RAMIREZ  
Sinodal

  
M.C. TOMAS REYNA CEPEDA  
Suplente

  
Dr. RAUL RODRIGUEZ GARCIA  
Coordinador de la División de Ingeniería



Buнавista, Saltillo, Coahuila. Mayo de 2010

## INDICE DE CONTENIDO

RESUMEN.....	1
I.-INTRODUCCION .....	2
Objetivos .....	4
Hipótesis .....	4
<b>II.-REVISION DE LITERATURA .....</b>	<b>5</b>
Las Substancias Húmicas (SH).....	5
Factores que intervienen en la Formación de Agregados.....	10
Efecto de las Substancias Húmicas en el Suelo.....	12
<b>III.-MATERIALES Y METODOS .....</b>	<b>18</b>
Localización del Área Experimental .....	18
Metodología .....	18
<b>IV.-RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>20</b>
Efecto de los tratamientos.....	20
Relacion de las variables con los tratamientos.....	25
<b>V.- CONCLUSIONES .....</b>	<b>28</b>
<b>VI.-LITERATURA CITADA .....</b>	<b>29</b>

## RESUMEN

Con el fin de determinar la efectividad de ácidos húmicos de leonardita (AHL) y dos tipos de bacterias, en la estabilidad de agregados de un suelo limo-arcilloso, se colocaron 10 kg del horizonte Ap de un suelo Calcisol en macetas de polietileno. Como tratamientos se les agregaron 2,4 y 6 ml.litro<sup>-1</sup> de agua de los AHL y las bacterias libre-fijadoras de nitrógeno, *Azospirillum* (AZ) y *Azotobacter* (AO), a la cantidad de 10 ml a cada maceta, a las concentraciones de 10<sup>7</sup>, 10<sup>8</sup> y 10<sup>9</sup> Unidades Formadoras de Colonias (UFC). Se midieron la materia orgánica (MO); la densidad aparente (Da); la textura y la estabilidad de agregados (Ag). Se encontró que la mezcla de la dosis baja de los AHL con la cantidad media de la bacteria AO, aumentaron la cantidad de MO y limo. La dosis media de los AHL, mezclada con las dosis baja y alta de la bacteria AZ, realizaron efecto significativo en la Da y en la arena. El TA lo efectuó en la arcilla; mientras que la MO y la arcilla, estabilizaron los agregados del suelo en estudio y se concluye que la mezcla de las cantidades bajas de ácidos húmicos de leonardita, las concentraciones medias de la bacteria *Azotobacter* y bajas y altas del *Azospirillum*, junto con la arcilla, tienen efecto positivo en la estabilidad de agregados, de un Calcisol.

Palabras clave: Agregados, leonardita, Ácidos húmicos, Ácidos Fúlvicos, *Azotobacter*, *Azospirillum*, Materia orgánica, Arcilla, Limo, Arena y Densidad Aparente.

## I.-INTRODUCCIÓN

El 90 por ciento de los suelos agrícolas del Noreste Mexicano, son los denominados Calcisoles, los que se caracterizan por poseer pH de 7.8 a 8.7; menos de uno por ciento de materia orgánica; la fracción arcilla está dominada por illitas y montmorillonitas y contienen más del 25 por ciento de carbonatos de calcio (FAO/UNESCO, 1994); lo anterior provoca suelos con baja estabilidad de agregados, los que al estar secos son fácilmente erosionables por el viento y cuando están húmedos, son difíciles de laborar.

La materia orgánica sólida humificada (compost) tiene un papel preponderante en la estabilidad de los agregados (Ag), por lo cual Tisdall y Oades (1982), propusieron un modelo conceptual, el cual es ampliamente aceptado. Éste se basa en tres agentes de unión: 1) transitorios: aquí los polisacáridos son los más importantes, 2) temporales: principalmente raíces, hifas de hongos y bacterias y 3) persistentes: macromoléculas orgánicas complejas con dominios aromáticos y alifáticos resistentes a la biodegradación, denominadas sustancias húmicas (SH), asociadas con cationes polivalentes y fuertemente adsorbidos por la matriz mineral del suelo.

Las SH son los ácidos húmicos (AH), los ácidos fúlvicos (AF) y las huminas residuales (HR). Los AF son de bajo peso molecular, producen un mayor, más favorable, más fuerte y rápido mecanismo de agregación, porque éstas poseen acidez total superior a los AH, es decir, mayor cantidad de grupos funcionales libres carboxilos, oxhidrilos fenólicos y carbonilos (-COOH, -OH y -COO) (Schnitzer, 2000). Para Oades (1984), los agentes transitorios y temporales son los responsables de la estabilidad de macroagregados, mientras que los persistentes lo hacen con los microagregados.

Piccolo y Mbagwu (1990), al adicionar desechos de cerdo y bovino y lodos residuales durante tres años, separaron agregados de 250 a 125, 125 a 50 y <50  $\mu\text{m}$ . En los microagregados, revelaron un incremento en el porcentaje de arena y una reducción de limo y arcilla en los agregados de <50  $\mu\text{m}$  de todos los suelos. Estos resultados presentan el efecto inducido en la agregación por la adición de desechos orgánicos. La estabilidad de los microagregados revela correlación significativa con el contenido de SH (AH solos y AH más AF) y no significativa con el contenido total de materia orgánica. Aquí, se considera que estas SH predominan como agentes de unión en los agregados, pero es necesario considerar el papel de los cationes que actúan como puentes de unión y concluyeron que hay una estrecha relación entre la estabilidad de agregados y las SH de alto peso molecular. La adición de material orgánico con constituyentes de alto peso

molecular, a los suelos, podría representar una práctica de manejo para mejorar la estabilidad de agregados.

Contrario a lo anterior, encontraron López *et al.* (2006), al adicionar diversas cantidades de AH y AF extraídos de un compost elaborado con estiércol de bovino y residuos de cocina y otros de leonardita (mineral fósil de carbón) y concluyeron que los AF (SH de mayor acidez total) tienen influencia significativa en algunas características físicas de un Calcisol como: la porosidad, la estabilidad de agregados y la velocidad de infiltración, pero no hay efecto significativo en la densidad aparente.

Los AH y los AF pueden complejar y/o quelatar cationes, debido a su alto contenido de grupos funcionales libres oxigenados; en los primeros dominan los grupos funcionales carboxilos (-COOH) y para los segundos los grupos carboxilos fenólicos (OH), porque más del 80 por ciento de la estructura molecular de dichos ácidos, están formados por los grupos funcionales mencionados (Schnitzer, 2000). Los grupos funcionales libres oxigenados, son los principales agentes que pueden adsorber o quelatar a los cationes, en función de la naturaleza de éstos, así, los AH quelatan con mayor facilidad los cationes metálicos, mientras que los AF, los alcalinos y alcalino térreos (Orlov, 1995).

Chen y Aviad (1990), comentan que entre los principales efectos de las SH en las características químicas, físicas y biológicas de los suelos, destacan, que como mejoradores aumentan la disponibilidad de algunos macro y micronutrientes ( K, Ca, P, Fe, Zn y Mn), incrementan la capacidad de intercambio catiónico, mejoran la estructura y aumentan la disponibilidad de humedad. Narro (1997), complementa al decir que las SH, reducen la compactación, facilita el laboreo, reduce la formación de costras y disminuye la resistencia al suelo a la penetración de raíces y Jhon *et al.* (1984) y Scareiner y Bethlefevey, (1998), destacan que las SH, poseen la habilidad para unir los agregados del suelo, en presencia de los cationes polivalentes (Scareiner y Bethlefevey, 1998).

En la actualidad, la mayoría de los trabajos de investigación se han centralizado en el uso de materiales orgánicos con SH de diverso peso molecular, para mejorar la estructura, sin embargo, no presentan con claridad el o los mecanismos y factores involucrados en la estabilidad de los agregados, por lo que en el presente trabajo se planteó lo siguiente.

## **OBJETIVO**

Determinar la efectividad de ácidos húmicos de leonardita y dos tipos de bacterias, en la estabilidad de agregados de un suelo limo-arcilloso.

## **HIPÓTESIS**

La mezcla de ácidos húmicos de leonardita y las bacterias, tienen efecto positivo en la estabilidad de agregados de un suelo limo-arcilloso.

## II.-REVISIÓN DE LITERATURA

### Las Substancias Húmicas (SH)

Desde finales del siglo XVIII, las SH han sido designadas como ácidos húmicos (AH), ácidos fúlvicos (AF) y huminas residuales (HR). Estas fracciones se definen estrictamente por su solubilidad en ácidos o álcalis. Aquí, es importante señalar que no existen profundas divisiones entre las SH; todas ellas forman parte de un sistema supramolecular extremadamente heterogéneo y las diferencias entre las subdivisiones, se deben a variaciones en la acidez, el grado de **hidrofobicidad** (el contenido de moléculas aromáticas y alquilo de cadena larga) y la entropía movidas por asociaciones de moléculas. Las SH se caracterizan por su estructura molecular, cromatografía y / o de la separación química de su gran número de diferentes moléculas bioorgánicas (Stevenson, 1984).

El término humus, se utilizó en la antigüedad para hacer referencia a la totalidad del suelo. Posteriormente se ha empleado como sinónimo de MO, mientras que en la actualidad, y como ya se ha mencionado, hace referencia a una fracción de dicha MO, engloba a un grupo de sustancias difícilmente clasificables, de color oscuro, muy resistentes al ataque microbiano, de alto peso molecular, de naturaleza coloidal y propiedades ácidas (Stevenson 1994). En conclusión, las SH, que se encuentran con gran asiduidad en el medio natural, en suelos, sedimentos y aguas (McCarthy *et al.* 1990) son residuos de las plantas y animales en estado de descomposición, unidos a los productos sintetizados por los microorganismos del suelo y ciertos intermedios de dicha síntesis (Ayuso, 1995). Esta composición no es estable sino que presenta gran dinamismo, por lo que más que un grupo de sustancias estamos ante un estado de la MO diferente, según las condiciones de su formación. Entre un 60 y un 90 por ciento de la materia orgánica del suelo está constituida por estos materiales de naturaleza lignoprotéica (Gallardo, 1980).

Pero las SH en el suelo, se encuentran asociadas mediante uniones de carácter débil (puentes de hidrógeno, fuerzas de Van der Waals) a otra fracción orgánica, constituida por productos de composición química definida y de alto peso molecular, polisacáridos y proteínas, sustancias simples como azúcares y aminoácidos y otras pequeñas moléculas. Sin embargo, en algunos casos, esas uniones son de tipo covalente. Todo este heterogéneo grupo de materiales se engloba bajo el término de sustancias no húmicas. En conclusión, el humus está formado por sustancias húmicas y no húmicas, aunque los términos humus y sustancias húmicas son empleados como sinónimos por algunos autores (Stevenson, 1994).



Actualmente se conoce, dentro de ciertos intervalos, la composición elemental de las SH; sin embargo la complejidad específica de estos materiales debida a la variabilidad de factores que intervienen en su formación (material original, microorganismos del suelo, condiciones ambientales...), hace que el estudio de las estructuras químicas que las conforman y de sus efectos sobre las plantas sea realmente complicado. Por consiguiente, la incapacidad de definir las SH en términos químicos específicos, nos fuerza a usar definiciones imprecisas, en base únicamente a las características observadas en los procesos de su fraccionamiento (Stevenson, 1984).

En este sentido, es posible realizar un fraccionamiento de las sustancias húmicas en distintos componentes que presentan propiedades físicas y químicas diversas (Figuras A y B). La técnica de fraccionamiento más común y aceptado es la basada en las diferentes solubilidades en agua a varios valores de pH. Así, Aiken *et al.* (1985) distingue:

**Ácidos húmicos:** la fracción insoluble en agua en condiciones ácidas ( $\text{pH} < 2$ ), pero soluble a valores altos de pH. **Ácidos fúlvicos:** es la fracción soluble en agua en todo el intervalo de pH y **Huminas:** es la fracción insoluble a cualquier valor de pH.

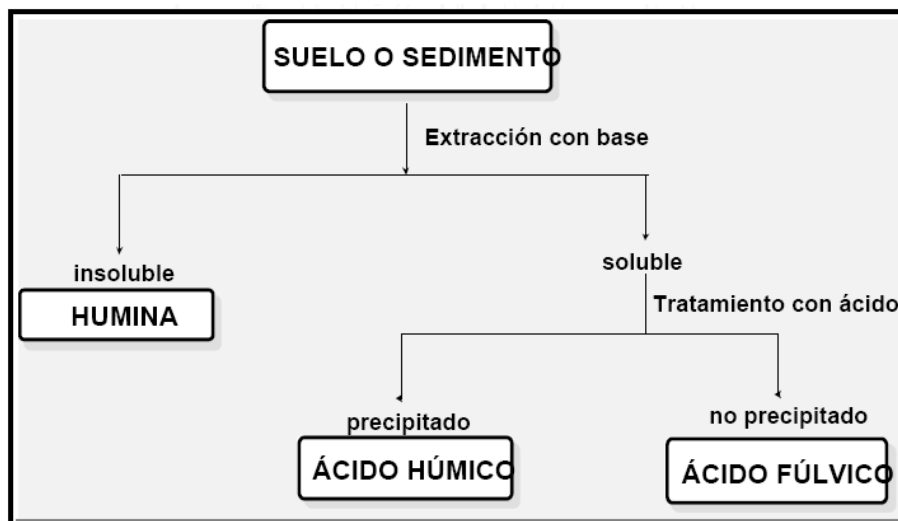


Figura A. Fraccionamiento de las sustancias húmicas (Stevenson, 1994).

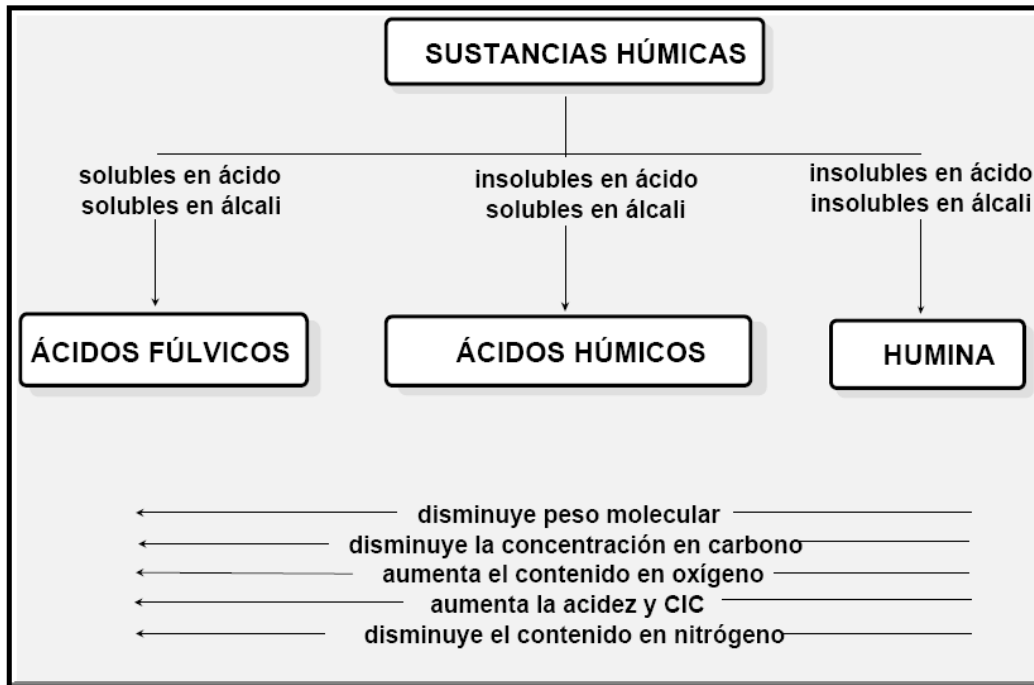


Figura B. Fraccionamiento de las sustancias húmicas. Propiedades (Cuesta, 1994).

La mayor parte de los estudios acerca de las SH se han llevado a cabo sobre las fracciones húmicas y fúlvicas; mientras que la humina, es la que se ha estudiado en menor extensión (Rice *et al.* 1988). La humina corresponde al 50 por ciento o más de la materia orgánica del suelo, de una gran inercia, está constituida por ácidos húmicos tan íntimamente unidos a la parte mineral del suelo que no pueden separarse de ella; así como también por SH de alta condensación y con un contenido de C superior al 60 por ciento. Por otro lado, los ácidos húmicos y fúlvicos son más activos tanto química como geológicamente (Ayuso, 1995).

Según Stevenson (1994), una vez precipitados los ácidos húmicos, podemos obtener la fracción fúlvica pura, mediante absorción-desorción sobre una resina XAD-8; pero este modelo de fraccionamiento de las sustancias húmicas aunque es, sin duda, el más extendido, no es el único. Los ácidos húmicos son adsorbidos a pH 3 y fraccionados mediante eluciones sucesivas con tampones de pH 7 y 11, agua y etanol (50-90 por ciento). La gran complejidad que presentan las sustancias húmicas, en cuanto a su composición y estructura, ha hecho necesario grandes esfuerzos para conocer dicha composición. Ésta varía dependiendo de su origen, método de extracción y otros parámetros. Sin embargo, las similitudes entre diversas sustancias húmicas son más numerosas que sus diferencias. Dichas analogías son las que han hecho que estos productos sean identificados como un grupo de sustancias. Además, los resultados de las mediciones de las propiedades de las

sustancias húmicas suelen ser valores medios debido precisamente a esa heterogeneidad (McCarthy *et al.* 1990).

Los análisis elementales de estos compuestos muestran que, en general, el 98-100 por ciento de sus elementos (libres de cenizas) son C, H, O, N, S y P. En general, los ácidos fúlvicos presentan mayores contenidos de oxígeno y menores de carbono. De esa manera las relaciones O/C para los ácidos húmicos presentan un valor aproximado de 0,5, mientras que para ácidos fúlvicos este valor se centra en 0,7 (Steelink, 1985). Este hecho se traduce en mayor contenido en grupos funcionales oxigenados en los ácidos fúlvicos (Cuadro 1).

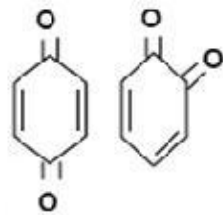
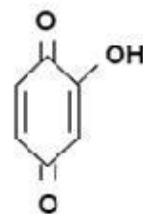
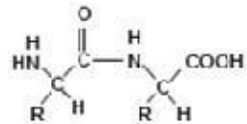
**cuadro 1.- Intervalos usuales para la composición elemental de las sustancias húmicas. (Steelink, 1985).**

<b>Elemento</b>	<b>Ácidos Húmicos(%)</b>	<b>Ácidos Fúlvicos(%)</b>
<b>Carbono</b>	53,8-58,7	40,7-50,6
<b>Oxígeno</b>	32,8-38,3	39,7-49,8
<b>Hidrógeno</b>	3,2-6,2	3,8-7,0
<b>Nitrógeno</b>	0,8-4,3	0,9-3,3
<b>Azufre</b>	0,1-1,5	0,1-3,6

La reactividad de las SH y por tanto, sus efectos sobre el suelo y las plantas están estrechamente relacionados con el tipo y concentración de grupos funcionales de las mismas. La mayor parte, son de tipo oxigenado: carboxilos, alcoholes, hidroxilos fenólicos y carbonilos. Además, la presencia de grupos nitrogenados está ampliamente demostrada (Varanini *et al.* 1995). Aunque también están presentes éteres, hidroxiquinonas y lactonas (Stevenson 1994) (Cuadro 2).

Los ácidos fúlvicos contienen mayor número de grupos funcionales de carácter ácido que los ácidos húmicos (Stevenson, 1994; Schnitzer, 1990), particularmente carboxilos y fenoles. Además, en los húmicos la mayor parte del oxígeno forma parte del núcleo o estructura central, en uniones éter o éster, mientras que para los ácidos fúlvicos está como COOH, OH o C=O. Aunque estos datos muestran cierta variabilidad, sí se puede decir que los ácidos fúlvicos presentan mayor acidez total que los húmicos, debido a esa mayor presencia de grupos carboxilo e hidroxilo (Cuadro 3).

**Cuadro .2. Grupos funcionales presentes en los sustancias húmicas.**

Amino	-NH <sub>2</sub>	Anhídrido	R-CO-O-CO-R'
Amina	R-CH <sub>2</sub> -NH <sub>2</sub>	Imina	R-CHNH
Amida	R-CO-NH <sub>2</sub>	Imino	=NH
Alcohol	R-CH <sub>2</sub> -OH	Eter	R-CH <sub>2</sub> -O-CH <sub>2</sub> -R'
Aldehído	R-CHO	Ester	R-COOR'
Carboxilo	R-COOH		
		Quinona	
Carboxilato	R-COO <sup>-</sup>		
Enol	R-CH=CH-OH		
Cetona	R-CO-R'		
		Hidroxiquinona	
Ceto-ácido	R-CO-COOH		
Carbonilo insaturado	-CH=CH-CHO		
		Péptido	

**Cuadro .3. Distribución de grupos funcionales oxigenados en sustancias húmicas (meq/100g). (Stevenson, 1994).**

	Ácidos húmicos	Ácidos fúlvicos
Acidez total	560-890	640-1420
COOH	150-570	520-1120
OH ácidos	210-570	30-570
OH alcohólicos y débilmente ácidos	20-490	260-950
C=O cetónicos y de quinonas	30-140	120-420
OCH <sub>3</sub>	30-80	30-120

La mayoría de los datos obtenidos indican que estos materiales están constituidos, en gran medida, por anillos aromáticos unidos entre sí y a otras estructuras de carácter alifático. Estas unidades formarían el esqueleto central o núcleo de las SH (Varanini *et al.* 1995). La unión desordenada de estas estructuras genera la formación de complejas macromoléculas, cuyas dimensiones pueden variar desde unos pocos cientos a varios miles de Dalton (Da) para los ácidos fúlvicos, hasta varios cientos de miles para los ácidos húmicos (Swift *et al.* 1971).

### **Factores que Intervienen en la Formación de Agregados**

La formación de agregados está estrechamente relacionada con la floculación y comportamiento de la doble capa eléctrica. Cuando se los deja solos, los suelos que poseen una doble capa eléctrica favorable, tiende a regenerar agregados y producir una estructura favorable.

Gavande (1976), menciona los factores más importantes que afectan la formación de agregados:

Cuando un suelo, contiene más arcillas, se tendrá mayor número de agregados puesto que une a las demás partículas de tamaños mayores para formarlos. La formación de agregados estables no se realiza en arenas y limos en ausencia de coloides. Un requisito indispensable de la formación de agregados es que haya material disponible que pueda ser agregado. El efecto agregante de la arcilla se debe a su acción cementante y a su propiedad de hinchamiento y contracción con los cambios de humedad.

Los iones intercambiables tienen gran efecto en la floculación de las arcillas. Generalmente,  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$  y  $\text{K}^+$  tienen efecto peptizante. En general, las masas de arcilla floculada solo alcanzan el tamaño de las partículas de limo; esto significa que la arcilla floculada es un medio muy desfavorable para el crecimiento de las plantas, a menos que posteriormente se formen agregados. El  $\text{Ca}^{++}$  y, en menor grado  $\text{Mg}^{++}$ , inducen la floculación de la arcilla y, al mismo tiempo, son importantes en la nutrición y en proporcionar al suelo una reacción favorable para el crecimiento de raíces y microorganismos. Un suelo exento de materia orgánica no se agrega fácil y rápidamente al agregarle  $\text{Ca}^{++}$ . Por otro lado el  $\text{Na}^+$  tiende a deflocular la arcilla y a crear una reacción en la que muchos de los nutrientes presentes no pueden aprovecharse y, por lo tanto, disminuye el crecimiento de raíces y microorganismos, causando una mala aeración.

Dentro de cementantes inorgánicos, los principales son los sesquióxidos de Fe y Al que forman coloides irreversibles, o muy lentamente reversibles, y que ayudan a formar agregados estables a la acción del agua. Este efecto es muy notable en los latosoles de los suelos tropicales que, aunque tienen altos contenidos de arcilla acidas, están generalmente bien agregados.

Las plantas ayudan a agregar las partículas del suelo en muchas formas. La más importante es, quizás, excreción de compuestos orgánicos gelatinosos por las raíces, que servirán como ligamentos entre las sustancias inorgánicas. La presión ejercida por la raíz, el CO<sub>2</sub> producido en la respiración y los minerales excretados también son importantes. Las pequeñas raicillas mantienen juntas las partículas. La deshidratación del suelo por la raíz causa grietas al encogerse el suelo, lo que origina rompimientos y, posteriormente, formación de agregados. El follaje de las plantas y sus residuos cubren el suelo y lo protegen de los cambios bruscos de temperatura y humedad, y de los efectos de las gotas de lluvia. Los residuos vegetales, tanto del follaje como de la raíz, proporcionan la base alimenticia de los microorganismos del suelo, que son uno de los principales factores agregantes.

El efecto agregante de compuestos y cementantes orgánicos, se hace mayor a medida que decrece el contenido de arcilla, además, al promover la agregación, ayuda a estabilizar la estructura del suelo. La materia orgánica forma quelatos con los metales, que, se cree ayudan a la agregación, por ejemplo, el Fe<sup>+++</sup> en los suelos podzol. No toda la MO estabiliza el suelo; algunos compuestos simples, como los azúcares, son ineficaces hasta que entran a formar parte del tejido microbiano. Las grasas, ceras, ligninas, proteínas, resinas y algunos otros compuestos orgánicos tienen un efecto estabilizador directo.

La materia orgánica cruda no ayuda a que se formen agregados estables. Para que sea efectiva su acción se requiere que los microorganismos del suelo intervengan. Según Martin (1995), la acción de los microorganismos puede ser directa o indirecta. Durante los periodos de intensa actividad microbiana, la célula y los microorganismos por si mismos pueden mantener unidos en forma mecánica, las partículas del suelo. En forma indirecta ayudan a la agregación, a través de los compuestos producidos durante la descomposición de la MO. La acción microbiana en ambos procesos puede ser muy efímera, ya que tanto las sustancias aglutinantes como los micelios envolventes pueden ser atacados a su vez por acción microbiana subsecuente. Debido a esto, si se quiere mantener un alto nivel de agregación se requerirá de adiciones periódicas de residuos orgánicos.

Los efectos de la temperatura sobre la formación de la estructura del suelo, son generalmente indirectos, ya que: *a)* induce el movimiento del vapor de agua, por crearse una diferencia en presiones de vapor; *b)* afecta la velocidad de las reacciones y, consecuentemente, la descomposición de la materia orgánica; *c)* afecta la actividad de las plantas y los microorganismos; *d)* como factor clima, tiene también mucha influencia en la formación del tipo y cantidad de arcilla, potencial electrocinético, cantidad de sales solubles y cantidad de materia orgánica presente.

El aire, físicamente, desempeña un papel decisivo en la formación de la estructura, al crear tensión superficial y debido a la expansión que sufre al humedecerse una masa de suelo. El aire actúa químicamente, ya que el aire del suelo es rico en CO<sub>2</sub>; éste se equilibra con la solución del suelo y ayuda a la solubilidad del Ca, el cual ayuda a la agregación. Biológicamente, el aire es necesario para que las raíces y microorganismos respiren y es tan importante en la formación de la estructura que, con periodos relativamente amplios de inundación, la estructura del suelo se deteriora o llega a destruirse completamente.

El agua participa en la formación de la estructura del suelo en varias formas:

- a) hinchamiento y contracción de coloides, causados por el humedecimiento y secado del suelo. Estos fenómenos causan el desarrollo de planos de debilitamiento, ocasionados por las tensiones y presiones en el suelo.
- b) la tensión superficial que resulta de la presencia de superficies de agua y aire mantiene a las partículas juntas y orientadas (cohesión).

### **Efecto de las Sustancias Húmicas en el Suelo**

Como es sabido, los suelos agrícolas clasificados como Calcisol poseen, generalmente, bajos contenidos en materia orgánica, que tienden a disminuir debido a las pérdidas que se producen por mineralización de la misma, a las labores agrícolas, a la relativa poca importancia actual del estercolado, así como al empleo preferente de abonos minerales de origen industrial. Esta disminución de la MO en los suelos, se traduce en un deterioro de las propiedades físico-químicas de los mismos, así como en su mayor erosionabilidad, con la consiguiente pérdida de productividad a medio y largo plazo (Barón *et al.* 1995). Estas prácticas están convirtiendo paulatinamente la agricultura tradicional en un ejercicio de tendencias claramente insostenibles; por ello, la utilización de MO está sobradamente justificada.

Está bien establecido que la adición de materia orgánica al suelo (MOS), no sólo puede reducir la densidad aparente ( $D_a$ ) y aumentar la capacidad de retención de agua, sino también aumentar de manera efectiva la estabilidad de agregados del suelo. Así, Angers y Carter (1996), observaron que la cantidad de agregados estables al agua, se asocian a menudo con un contenido alto de MOS, y en particular a la de carbono lábil y a menudo se relaciona positivamente con la estabilidad macro global. Kay y Angers (1999), informaron que un mínimo del dos por ciento de MOS, es necesario para mantener la estabilidad estructural y observaron que si el contenido de MOS, es de entre 1.2 a 1,5 por ciento, la estabilidad disminuyó rápidamente. También, Boix *et al.* (2003), mostraron que es necesario alcanzar un umbral entre 3 a 3.5 por ciento de MOS, para lograr aumentar la estabilidad de agregados y observaron que por debajo de este umbral, no hay efectos sobre la estabilidad de agregados. Chaney y Swift (1984), investigaron la estabilidad de agregados de 26 suelos de zonas agrícolas y encontraron una correlación lineal altamente significativa entre la estabilidad de los agregados y el contenido de materia orgánica. De hecho, la mayoría de los estudios indican un aumento lineal de la estabilidad de los agregados y el tamaño global, con niveles crecientes de MOS. Aunque muchos estudios, están de acuerdo en una relación positiva entre la estabilidad de agregados y la MOS; sin embargo, entre los investigadores no hay acuerdo si hay un valor umbral definido. Loveland y Webb (2003), concluyeron, tras una revisión de varios estudios, que no hay niveles de un umbral universal de los contenidos de MOS, que determinen la estabilidad de agregados, pero éstos pueden ser establecidos.

La importancia de los polisacáridos y los hidratos de carbono fácilmente extraíbles en la formación de agregados, se ha señalado en varios estudios (Chaney y Swift, 1984; Haynes y Swift, 1990; Robertson *et al.* 1991). Martens y Frankenberger (1992), demostraron que en un suelo franco-arcilloso con riego y donde se adicionaron  $25 \text{ t ha}^{-1}$  por año, de enmiendas orgánicas (paja de cebada, estiércol de aves de corral, lodos de una planta tratadora y alfalfa), el contenido de sacáridos en total, fue el factor más importante en la mejora de la estabilidad de agregado. Otros estudios subrayan la importancia particular de los polisacáridos producidas por microorganismos: Friedel *et al.* (1996), encontraron que la parte "microbiana activa" de la MOS, está estrechamente relacionado con la cantidad de agregados estables al agua, y Rogers *et al.* (1991), observaron que al inocular un suelo esterilizado con algas unicelulares, dio lugar a un aumento de la estabilidad de los agregados del suelo, acompañado de un aumento en el contenido de polisacáridos.



Así mismo, Lynch (1984) demostró que algunos residuos orgánicos sólo son eficaces en la producción de algunos carbohidratos cuando los microbios están activos y abundantes, y Oades (1984) y Degens (1997), declararon que los hidratos de carbono, derivados de la actividad microbiana, son los principales responsables de la estabilización de los agregados de los suelos. Gerzabek (1995), explica que la mayor estabilidad global, después de la adición de polisacáridos, es el resultado de una mayor producción de biomasa microbiana del suelo, debido a las fuentes de carbono fácilmente disponible, y Carter (1992) encontró que la MOS, refleja la actividad biológica, es un mejor indicador de la estabilidad estructural, ya que contribuye directamente a los mecanismos de enlace, entre la MOS y las arcillas del suelo.

De estos estudios es evidente que la fracción de carbono lábil, que consiste principalmente de hidratos de carbono, es fundamental en la formación de agregados (Kay y Angers, 1999).

Varios estudios han tratado de distinguir aún más los componentes específicos de la fracción de hidratos de carbono lábil, que pueden actuar como factores clave en la Haynes y Swift (1990) subrayan que al menos dos etapas importantes están implicadas en la formación de agregados: una fase de acumulación inicial (impulsado por polisacáridos microbianos) y una fase de estabilización (impulsada por los materiales húmicos). Así, Ghani *et al.* (2003), abogó por la utilización de carbohidratos como un indicador sensible para la determinación de los cambios sutiles en la calidad del suelo, porque éstos promueven la biomasa microbiana, carbohidratos más solubles, aminas y nutrientes lábiles. Mientras que los polisacáridos han sido implicados en la importancia de la formación de agregados, las SH, en particular aquellos con un alto contenido de compuestos aromáticos, a menudo se consideran de menor importancia en la formación de agregados (Shepherd *et al.* 2001).

Sin embargo, varios estudios han encontrado lo contrario, al determinar que componentes aromáticos de los compuestos húmicos, pueden desempeñar un papel fundamental en la Por ejemplo, Chaney y Swift (1984) mostraron que los coeficientes de correlación para la estabilidad de los agregados, fueron mejores para los materiales húmicos extraídos con hidróxido de sodio y después con una extracción con pirofosfato de sodio. Lo anterior sugiere, que los materiales húmicos de alto peso molecular, son más importantes que los de bajo peso molecular; también encontraron que el contenido de hidratos de carbono, fue altamente correlacionado con la estabilidad de agregados, que indica que ambos, hidratos de carbono y sustancias húmicas, son importantes para la estabilidad de agregados.

En un estudio posterior, Chaney y Swift (1986) investigaron los efectos de los materiales húmicos adsorbidos sobre la agregación, utilizando suelos saturados con sodio (Na) y calcio (Ca). Encontraron que los ácidos húmicos, por sus características físicas, por sí solas, no realizaron ningún efecto en la estabilidad de agregados. También, incubaron el suelo con glucosa y se produjo el mismo efecto, es decir, no hay efecto en la estabilidad de los agregados.

Sin embargo, si con la adición de los ácidos húmicos, éstos son adsorbidos por los minerales del suelo y si se incubaba con la glucosa, la estabilidad de agregados fue alta y persiste con el tiempo. Se observaron resultados similares tanto en la superficie (3,6 % MOS) y el subsuelo (0,5 % MOS). Por lo tanto, la adsorción de los ácidos húmicos parece ser esencial para estabilizar los agregados.

En un estudio posterior, Swift (1991) estudió específicamente los efectos de los polisacáridos producidas por microorganismos (goma xantana y alginato), glucosa y sustancias húmicas sobre la agregación. Suelos se incubaron con glucosa, goma de xantano y alginato para estudiar la producción de agregados estabilizados. Él encontró que los efectos estabilizadores de la goma xantana y alginato, se debieron a la acción de unión de estos compuestos y los efectos del tratamiento de la glucosa no se debieron a la acción de la glucosa en sí, sino debido a la producción de polisacáridos exocelular por microorganismos, como resultado de la metabolización de la glucosa. Todos los tratamientos produjeron agregados estables en las cuatro primeras semanas de la incubación y ésta, disminuyó en el total de incubación, el que fue de 12 semanas. Además, la glucosa produjo agregados más estables, que persistieron durante más tiempo, que los producidos en la goma xantana y el alginato; lo que sugiere que “in-situ” se produjeron polisacáridos microbianos y fueron más efectivos que los añadidos. Sin embargo, donde la incubación del suelo fue con los elementos (Na y Ca), la estructura total original fue destruida por los iones de lavado. Todos los tratamientos como los hidratos de carbono, fueron ineficaces en la estabilización de agregados. Sólo después de la incubación con ácidos húmicos adsorbidos por las arcillas, se produjeron nuevos agregados y la adición de glucosa mejora aún más la producción de nuevos agregados. Resultados similares fueron observados por Haynes y Naidu (1998), quien señaló que después de la adición de materia orgánica fácilmente degradable, hubo un crecimiento de hongos de color blanco de la actividad microbiana y la producción de polisacáridos extracelulares, lo que dio lugar a un rápido aumento de la estabilidad de agregados. Sin embargo, este efecto fue sólo temporal y además, sólo con el material descompuesto se

logró un aumento lento y constante de la estabilidad de agregados; lo anterior sugirió que el resultado se debe a la presencia de las sustancias húmicas.

Piccolo y Mbagwu (1990), investigaron el papel específico de los ácidos húmicos en la formación de agregados, mediante la aplicación de la goma de polisacáridos hidrofílicos e hidrofóbicos, como el ácido esteárico en un suelo con materia orgánica (MO), retenida y con MOS removido por  $H_2O_2$  y con y sin adición de ácidos húmicos. Ellos encontraron que la estabilidad global, fue mayor para la goma de polisacárido cuando la MOS fue eliminada; mientras que la estabilidad global fue mejor para el ácido esteárico, cuando se mantiene en la MOS. La adición de los ácidos húmicos (a  $0,2 \text{ g kg}^{-1} = 400 \text{ kg ha}^{-1}$  como el lignito), aumentó el efecto prolongado y la estabilidad de agregados con el ácido esteárico, lo que sugiere un efecto sinérgico de los ácidos húmicos y el ácido esteárico, y demostraron que la estabilidad de agregados del suelo se mejora y mantiene un mejor tiempo de hidrofobisidad de los componente hidrofílicos.

Piccolo *et al.* (1997), investigaron los efectos cíclicos de humedecimiento y secado y tratamiento previo de los suelos con el carbón, derivado de las sustancias húmicas en la estabilidad global. Determinaron que la mineralogía de la arcilla y la química de los compuestos orgánicos, la estabilidad total fue afectada. En virtud de los ciclos de humedecimiento y secado, los suelos esmectíticos e illíticos perdieron la estabilidad de agregados, pero se mostró una mejora en suelos caoliníticos, después de unos cuantos ciclos. Las mejores cantidades de carbono ( $0,10 \text{ g kg}^{-1} = 100 \text{ kg ha}^{-1}$ ) de las sustancias húmicas, con más de 70 por ciento de grupos aromáticos, mejora la estabilidad global en todos los suelos y redujo el efecto de la desagregación de los ciclos de humedecimiento y secado.

La razón para el efecto beneficioso de las sustancias húmicas, para la estabilidad de agregados, se pensaba que era debido a la formación de complejos arcilla – ácidos húmicos (a través de puentes de cationes polivalentes adsorbidos en las superficies de las arcillas), que orientan los grupos ácidos funcionales de los materiales húmicos (carboxilo y fenoles), hacia el interior de los agregados, dejando grupos alifáticos y aromáticos hidrófobos de cara al exterior. Esto llevaría a la formación de una capa repelente al agua con alta tensión superficial, de manera efectiva la reducción de la infiltración de agua en los agregados. El efecto positivo de los materiales hidrofóbicos, en la estabilidad de agregados, se ha demostrado por Capriel *et al.* (1990), quien encontró alta correlación entre el coeficiente de estabilidad de agregados y el de grupos alifáticos (hidrofóbicos) y la biomasa microbiana del suelo ( $r^2 = 0.91$ ). Parece que la fracción hidrófoba, formó una celosía repelente al agua

alrededor de los agregados y mejoró la estabilidad de agua de los agregados. Los estudios de Piccolo *et al.* (1997) y Piccolo y Mbagwu (1990) y otros estudios (Chaney y Swift, 1986; Fortún *et al.* 1989), sugieren que la aplicación de las sustancias húmicas (lignito y carbón oxidado) sería una fuente económicamente viable para la rehabilitación de suelos degradados, ya que las sustancias húmicas son relativamente baratas (0.5-1.0 dólares de los EE.UU.) y sólo pequeñas cantidades (100-300 kg ha<sup>-1</sup>, dependiendo de la sustancia), son obligatorios, en comparación con cantidades mucho más grandes para aplicaciones de estiércol de bovino (50-200 toneladas por hectárea). Sin embargo, Piccolo *et al.* (1997) también encontró que había un límite superior, más allá de los efectos beneficiosos de las sustancias húmicas. Comentan que más de 0.1 g.kg<sup>-1</sup> de sustancias húmicas, pueden penetrar en el dominio de arcilla de manera efectiva y a su vez, puede desplazar partículas de arcilla, lo cual puede causar la dispersión de las arcillas, lo que reduciría la estabilidad.

Visser y Caillier (1988), estudiaron el efecto de dispersión de las sustancias húmicas (ácidos húmicos extraídos de un suelo Gleysol húmico a pH 6.7), a concentración de 40 mg.litro<sup>-1</sup> (0,004%). En comparación con hexametáfosfato de sodio a la misma concentración, los ácidos húmicos fueron 140 veces más eficaces en la dispersión de arcilla fina (<0.6µm) fracción y 1.2 veces más eficaz para la dispersión de la arcilla gruesa (0,6-20µm).

Del mismo modo, Durgin y Chaney (1984), encontraron que ácidos húmicos de alto peso, los grupos alifáticos y aromáticos policarboxílicos, fueron capaces de dispersar caolinitas, mediante compensación de la carga positiva en los bordes de las partículas de arcilla y con esto promovió la dispersión de la arcilla. Visser y Caillier (1988), sugirieron que el poder de dispersión de las sustancias húmicas, pueden afectar los procesos del suelo tales como podzolisation, donde las concentraciones de ácidos húmicos de hasta 60 mg.litro<sup>-1</sup>, se producen y donde el poder de dispersión podría contribuir a la formación de horizontes con arcilla lixiviada.

### **III.-MATERIALES Y MÉTODOS**

#### **Localización del Experimento**

El experimento se efectuó, en un invernadero del Departamento de Ciencias del Suelo del *Campus* principal de la Universidad Autónoma Agraria “Antonio Narro” (UAAAN), ubicada en Buenavista, Saltillo, Coahuila, México, a los 25° 23’ de latitud norte, 101° 00’ de longitud oeste y a la altura de 1,742 msnm.

#### **Metodología**

El horizonte Ap de un suelo Calcisol del área experimental denominada “El Bajío”, de los terrenos de la UAAAN fue colectado, secado al aire y 10 kg colocados en macetas de polietileno. Como tratamientos se les agregaron 2,4 y 6 ml.litro<sup>-1</sup> de agua de ácidos húmicos de leonardita (AHL). También, se adicionaron bacterias libre-fijadoras de nitrógeno, *Azospirillum* (Az) y *Azotobacter* (Ao), a la cantidad de 10 ml a cada maceta, a las concentraciones de 10<sup>7</sup>, 10<sup>8</sup> y 10<sup>9</sup> Unidades Formadoras de Colonias (UFC) y solo agua como testigo absoluto (TA). La combinación de los AHL y las bacterias, generaron 24 tratamientos; éstos se distribuyeron de acuerdo al Diseño Experimental Completamente al Azar, con tres repeticiones por tratamiento (Cuadro 4).

Cuadro 4.- Distribución de los tratamientos empleados.

Tratamientos	Mezclas
1	AH2+AZ7
2	AH2+AZ8
3	AH2+AZ9
4	AH4+AZ7
5	AH4+AZ8
6	AH4+AZ9
7	AH6+AZ7
8	AH6+AZ8
9	AH6+AZ9
10	AH2
11	AH4
12	AH6
13	AZ7
14	AZ8
15	AZ9
16	AH2+AO5
17	AH2+AO7.5
18	AH2+AO10
19	AH4+AO5
20	AH4+AO7.5
21	AH4+AO10
22	AH6+AO5
23	AH6+AO7.5
24	AH6+AO10
25	Agua

Las variables evaluadas fueron: materia orgánica (MO) (Walkley and Black, 1934); nitrógeno total (NT) (Kjeldalh); densidad aparente (Da) (Método de la probeta); textura (Hidrómetro de Boyoucos) y estabilidad de agregados (Ag), mediante la fórmula propuesta por Monnier (1984):

$$\text{Ag (\%)} = 0.72 + 2.54 (\% \text{ MO} / \% \text{ A}) \times 100$$

Donde:

Ag: Estabilidad de agregados.

MO: Materia orgánica.

A: Arcilla.

El análisis estadístico consistió en el análisis de varianza (ANVA) y la prueba de medias de Tukey ( $P \leq 0.05$ ), para lo cual se empleo el paquete para computador MINITAB, versión 15 para Windows, además, Análisis de Regresión Lineal Simple y Múltiple, donde la Ag fue la variable dependiente y las demás características medidas, las variables independientes.

#### IV.-RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la materia orgánica (MO), hay efecto significativo de los tratamientos (Cuadro 5). Así, de manera general se puede establecer que al adicionar la mezcla de 2 ml.litro<sup>-1</sup> de agua de los ácidos húmicos, con las tres cantidades de la bacteria *Azospirillum* (AZ), la cantidad de MO fue constante. Con la dosis de 4 ml.litro<sup>-1</sup> de agua de los ácidos húmicos, mezclada con la cantidad baja de AZ, el valor de la MO no sobrepasó de 1.3 por ciento; la misma dosis de ácidos húmicos con la cantidad media de esta bacteria fue de 2.0 por ciento y con la dosis alta del microorganismo, se redujo a 1.7 por ciento. Con la cantidad alta de los ácidos húmicos, mientras aumentó la dosis de la bacteria, disminuyó el valor de la MO. Conforme aumentó la cantidad de los ácidos húmicos sin mezclar, el porcentaje de la MO, también aumentó y por el contrario, conforme aumentó la dosis de la bacteria sola, el valor de la MO disminuyó. Con la adición de los ácidos húmicos a razón de 2 ml.litro<sup>-1</sup> de agua, conforme aumentó la dosis de la bacteria *Azotobacter* (AO), el porcentaje de MO fue superior; cuando se agregaron los ácidos húmicos a 4 ml.litro<sup>-1</sup> de agua, a la dosis media de la bacteria, el valor de la MO fue menor en comparación a la mezcla con la dosis baja y alta. Con la cantidad alta de los ácidos húmicos, conforme la dosis de esta bacteria fue mayor, el porcentaje de MO disminuyó. De forma particular, se puede decir que la con la bacteria AZ sola, a la dosis baja (AZ7) y media (AZ8) y con la mezcla de 2 ml.litro<sup>-1</sup> de agua de los ácidos húmicos y la dosis media de la bacteria AO (AH2+AO10), estos tratamientos aventajaron al testigo absoluto (TA) en 15 por ciento (Figura 1).

Cuadro 5.- Análisis de varianza para materia orgánica (MO) de un Calcisol, con la adición de ácidos húmicos de leonardita y dos bacterias.

Fuente	gl	SC	CM	F	P
Tratamientos	23	3.88510	0.16892	2.23	0.010*
Repetición	2	0.03600	0.01800	0.24	0.790 NS
Error	46	3.49000	0.07587		
Total	71	7.41110			

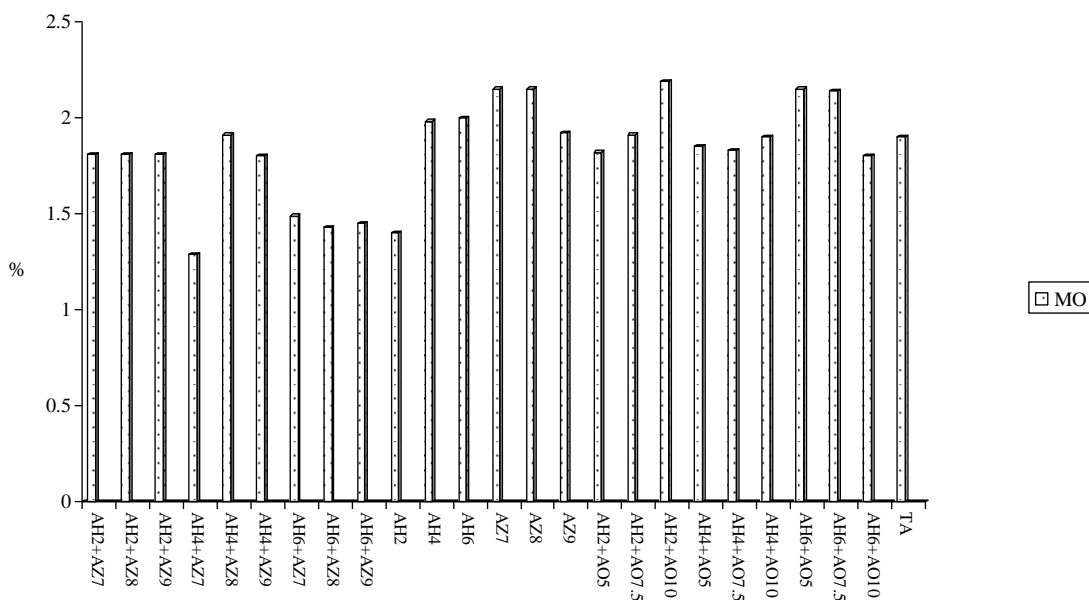


Figura 1.- Contenido de materia orgánica de un Calciisol, con la adición de ácidos húmicos de leonardita y dos bacterias.

Los tratamientos realizaron efecto significativo en la densidad aparente (Da) (Cuadro 6). Así, de manera general se puede establecer que al adicionar la mezcla de 2 ml.litro<sup>-1</sup> de agua de los ácidos húmicos, con las dos primeras cantidades de la bacteria *Azospirillum* (AZ), la cantidad de MO fue constante. Con la dosis de 4 ml.litro<sup>-1</sup> de agua de los ácidos húmicos, mezclada con la cantidad baja de AZ, el valor de la MO no sobrepasó de 1.4 por ciento; con la misma dosis de ácidos húmicos con la cantidad media de esta bacteria el valor disminuyó y con la dosis alta del microorganismo, aumentó a 1.3 por ciento. Con la cantidad alta de los ácidos húmicos, mientras aumentó la dosis de la bacteria, disminuyó el valor de la MO. Conforme aumentó la cantidad de los ácidos húmicos sin mezclar, el porcentaje de la MO, también aumentó y de igual forma, conforme aumentó la dosis de la bacteria sola, el valor de la MO también. Con la adición de los ácidos húmicos a razón de 2 ml.litro<sup>-1</sup> de agua, conforme aumentó la dosis de la bacteria *Azotobacter* (AO), el porcentaje de MO fue superior; cuando se agregaron los ácidos húmicos a 4 ml.litro<sup>-1</sup> de agua, a la dosis media de la bacteria, el valor de la MO fue menor en comparación a la mezcla con la dosis baja y alta. Con la cantidad alta de los ácidos húmicos, conforme la dosis de esta bacteria fue mayor, el porcentaje de MO permaneció constante. De forma



particular, se puede decir que con la mezcla de 4 ml.litro<sup>-1</sup> de agua de los ácidos húmicos y la dosis baja de la bacteria AZ (AH4+AZ7), este tratamiento aventajó al testigo absoluto (TA) en 16 por ciento (Figura 2).

Cuadro 6.- Análisis de varianza para la densidad aparente (Da) de un Calcisol, con la adición de ácidos húmicos de leonardita y dos bacterias.

Fuente	gl	SC	CM	F	P
Tratamientos	23	0.367517	0015979	1.76	0.050*
Repetición	2	0.002455	0.001227	0.14	0.874 NS
Error	46	0.416466	0.009054		
Total	71	0.786438			

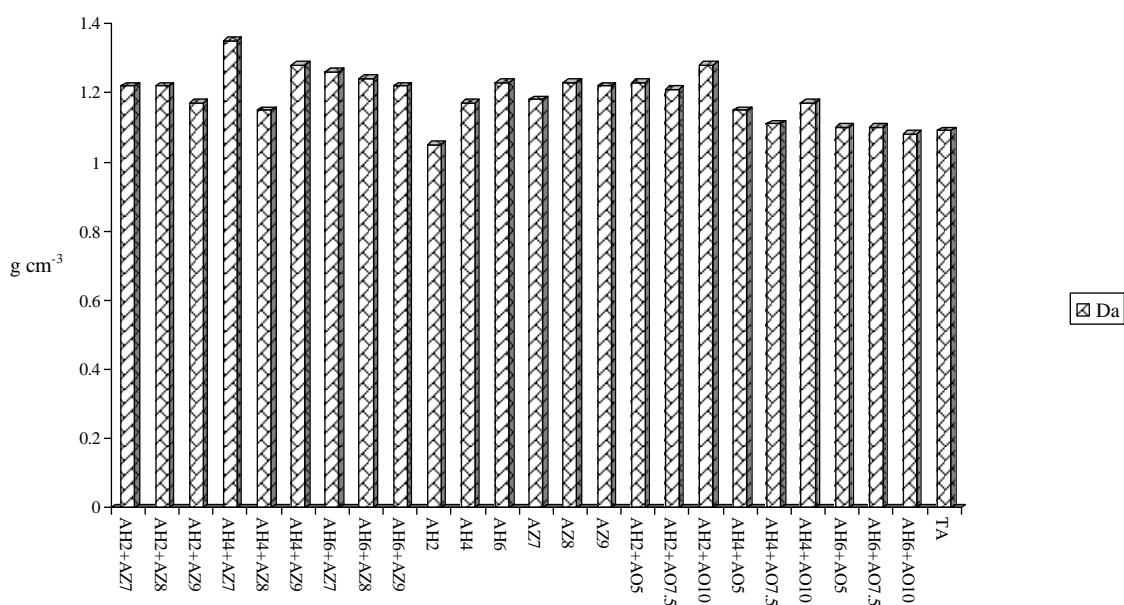


Figura 2.- Densidad aparente de un Calcisol, con la adición de ácidos húmicos

Los tratamientos efectuaron efecto altamente significativo en los contenidos de arena y limo; mientras que en la arcilla, solo fue significativo (Cuadros 7, 8 y 9). Los valores de la arena fueron los más inferiores, porque no sobrepasaron el 25 por ciento. Los porcentajes de limo superaron a las otras dos, ya que fluctuaron entre 35 y 45 por ciento y los valores

de la arcilla, solo en el testigo absoluto superaron a los otros dos tipos de partículas (Figura 4).

Cuadro 7.- Análisis de varianza para la arena (A) de un Calcisol, con la adición de ácidos húmicos de leonardita y dos bacterias.

Fuente	gl	SC	CM	F	P
Tratamientos	23	1188.49	51.67	4.46	0.000**
Repetición	2	9.74	4.87	0.42	0.659 NS
Error	46	532.84	11.58		
Total	71	1731.07			

Cuadro 8.- Análisis de varianza para el limo (L) de un Calcisol, con la adición de ácidos húmicos de leonardita y dos bacterias.

Fuente	gl	SC	CM	F	P
Tratamientos	23	1188.388	51.669	5.67	0.000**
Repetición	2	0.250	0.125	0.01	0.986 NS
Error	46	419.417	9.118		
Total	71	1608.055			

Cuadro 9.- Análisis de varianza para la arcilla (Ar) de un Calcisol, con la adición de ácidos húmicos de leonardita y dos bacterias.

Fuente	gl	SC	CM	F	P
Tratamientos	23	114.687	4.986	1.77	0.050*
Repetición	2	11.262	5.631	2.00	0.147 NS
Error	46	129.738	2.820		
Total	71	255.687			

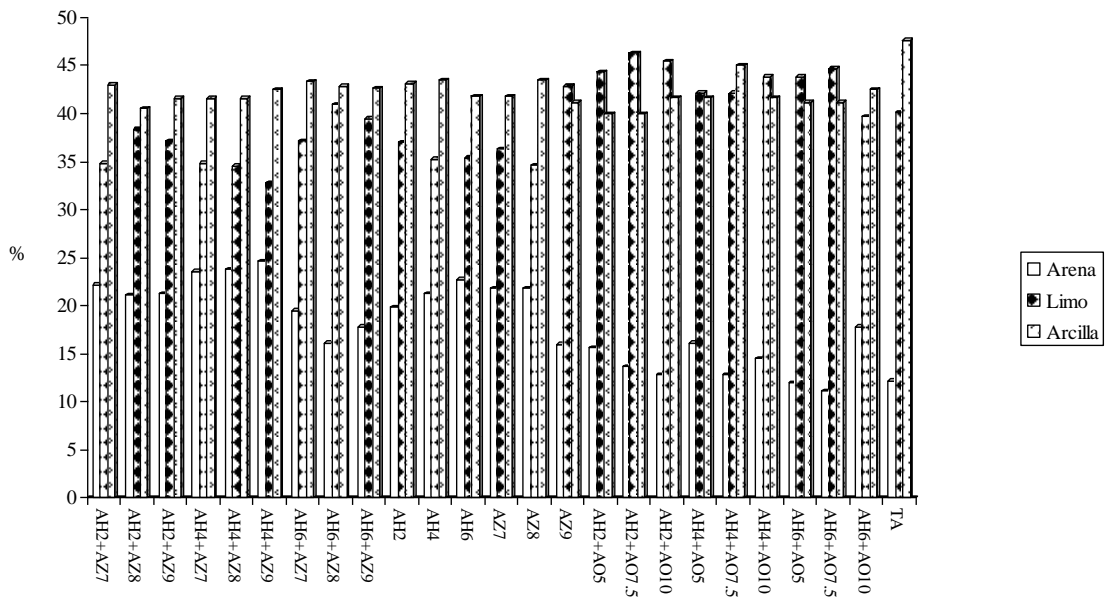


Figura 3.- Contenido de arena, limo y arcilla de un Calcisol, con la adición de ácidos

Los tratamientos realizaron efecto altamente significativo en la estabilidad de agregados (Ag) (Cuadro 10). Así, de manera general se puede establecer que al adicionar la mezcla de 2 ml.litro<sup>-1</sup> de agua de los ácidos húmicos, con la cantidad media la bacteria *Azospirillum* (AZ), la cantidad de la estabilidad de agregados (Ag) fue superior, a cuando se aplicó la dosis baja de AZ y con la cantidad baja del microorganismo, el porcentaje de Ag disminuyó considerablemente. Con la dosis de 4 ml.litro<sup>-1</sup> de agua de los ácidos húmicos, conforme aumentó la cantidad de la bacteria, el valor de la Ag disminuyó. Con la cantidad alta de los ácidos húmicos y con la dosis media de la bacteria, el valor de la Ag superó a la agregación de las dosis baja y alta de la bacteria. Conforme aumentó la cantidad de los ácidos húmicos sin mezclar, el porcentaje de la Ag también aumentó; mientras que al aumentar las cantidades de la bacteria sin mezclar, disminuyó el valor de la Ag también. Con la adición de los ácidos húmicos a razón de 2 ml.litro<sup>-1</sup> de agua y la dosis media de la bacteria *Azotobacter* (AO), el porcentaje de la Ag fue superior a cuando se aplicaron las dosis baja y alta; cuando se agregaron los ácidos húmicos a 4 ml.litro<sup>-1</sup> de agua y la dosis

alta de la bacteria, el valor de la Ag fue superior en comparación a la mezcla con la dosis baja y media. Con la cantidad alta de los ácidos húmicos y la dosis baja de esta bacteria, el valor de Ag fue superior a la adición de las otras dos dosis. De forma particular, se puede decir que con la mezcla de 2 ml.litro<sup>-1</sup> de agua de los ácidos húmicos y la dosis alta de la bacteria AO (AH2+AO15), este tratamiento aventajó al testigo absoluto (TA) en ocho por ciento (Figura 4).

Cuadro 10.- Análisis de varianza para la estabilidad de agregados (Ag) de un Calcisol, con la adición de ácidos húmicos de leonardita y dos bacterias.

Fuente	gl	SC	CM	F	P
Tratamientos	23	155.428	6.758	2.88	0.001 **
Repetición	2	4.146	2.073	0.88	0.420 NS
Error	46	107.775	2.343		
Total	71	267.349			

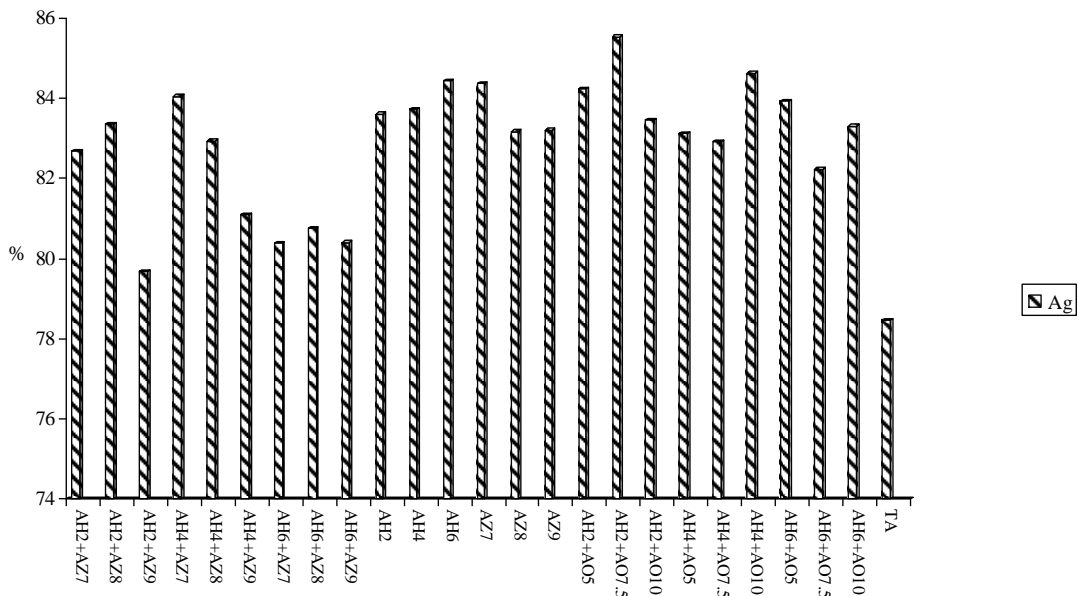


Figura 4.- Estabilidad de agregados de un Calcisol, con la adición de ácidos húmicos de leonardita y dos bacterias.

El Cuadro 11, muestra que la Ag está altamente correlacionada con los contenidos de MO y la arcilla; es decir, hay efecto significativo de la MO y la arcilla en la Ag. También, la arena se relacionó significativamente con el limo, la densidad aparente y la arcilla. El limo realizó efecto en la densidad aparente.

Cuadro 11.- Matriz de correlaciones de las variables medidas a un Calcisol, con la adición de ácidos húmicos de leonardita y dos bacterias.

	MO (%)	Densidad aparente (g cm <sup>-3</sup> )	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)
Densidad aparente (g cm <sup>-3</sup> ) (Correlación)	-0.044 0.714				
Arena (%) (Correlación)	-0.171 0.151	0.307 0.009			
Limo (%) (Correlación)	0.127 0.287	-0.266 0.024	-0.924 0.000		
Arcilla (%) (Correlación)	0.126 0.290	-0.131 0.271	-0.285 0.015	-0.103 0.387	
Estabilidad Agregados (%) (Correlación)	0.197 0.097	-0.058 0.631	0.080 0.503	0.035 0.773	-0.295 0.012

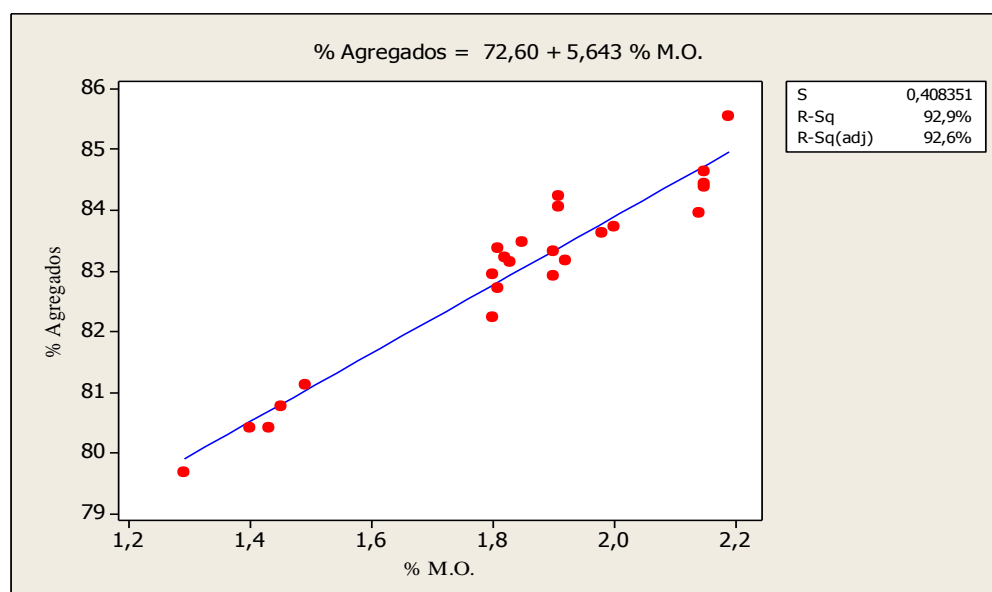


Figura 5. Correlación entre la estabilidad de agregados y la materia orgánica de un suelo limo-arcilloso, con la adición de sustancias húmicas y dos bacterias.

ECUACIONES DE REGRESION LINEAL		
%Agregados = 72,6 + 5,64 % M.O.	S = 0,408351	R-Sq=92,9%
%Agregados = 85,9 - 2,44 Da.= gr/cm <sup>3</sup>	S =1,52504	R-Sq=1,3%
%Agregados = 84,1 - 0,0597 % ARENA	S =1,51430	R-Sq=2,7%
%Agregados = 79,2 + 0,0957 % LIMO	S =1,48061	R-Sq=7,0%
%Agregados = 102 - 0,460 % ARCILLA	S =1,42990	R-Sq=13,3%
%Agregados = 50,2 + 5,62 % M.O. + 1,39 Da + 0,279%ARENA + 0,298% LIMO+0,0931%ARCILLA	S =0,226650	R-Sq=98,2%

Cuadro 12.- Tabla de ecuaciones de regresión lineal y múltiple donde se comparan los tratamientos con el % de Agregados.

A forma de discusión, se tiene que los contenidos de materia orgánica (MO) aumentan con la mezcla de las cantidades bajas de los ácidos húmicos y las concentraciones medias de la bacteria AO. Lo anterior concuerda con lo establecido por Tisdall y Oades (1982), en su conceptualización sobre la jerarquización de agregados, al establecer que con el incremento en la cantidad de MO y carbón orgánico (CO), se incrementa el tamaño de los agregados, es decir, dominan los macroagregados, los cuales están formados por microagregados, más los agentes de unión. En otras palabras, los ácidos húmicos de leonardita son agentes persistentes de la agregación de suelos, pero de los microagregados. Aquí, los grupos funcionales libres oxidrilos ( $-OH$ ) (cargas eléctricas negativas) de los ácidos húmicos, actuaron como ligantes naturales de cationes como el calcio, lo cual quiere decir que estos compuestos orgánicos están bien polimerizadas (Fründ *et al.* 1994), pero, para Evangelou *et al.* (2004), todas las moléculas que sirven como agentes ligantes, sin importar su origen, tiene una capacidad limitada de unir moléculas o iones, dependiente de la cantidad de sitios de unión.

También es necesario establecer que la acidez total (AT), es generalmente considerada como la que provee una adecuada medida de la habilidad de los ácidos húmicos para unirse con cationes, sin embargo, existe la posibilidad de que grupos funcionales no oxigenados podrían estar involucrados, como son las aminas y las amidas (Schnitzer, 2000). Así, en el suelo en estudio, los ácidos húmicos junto con la arcilla y la MO, formaron complejos órgano-minerales, lo cual produce la superior estabilidad de agregados, lo que muestra que los ácidos húmicos son agentes persistentes en la estabilidad de agregados. Además, la mezcla de las sustancias húmicas mezcladas con las bacterias, tienen efecto en la densidad aparente, la arena, el limo y la arcilla.

## CONCLUSIÓN

La mezcla de las cantidades bajas de ácidos húmicos de leonardita, las concentraciones medias de la bacteria *Azotobacter* y bajas y altas del *Azospirillum*, junto con la arcilla, tienen efecto positivo en la estabilidad de agregados, de un Calcisol.

## VI.-LITERATURA CITADA

ALBUZIO, A., CONCHERI, G., NARDI, S., DELL'AGNOLA, G., 1994. Effect of humic fractions of different molecular size on the development of oat seedlings grown in varied nutritional conditions. In N. Senesi. Mianom, T.M. (Eds.), Humic Substances in the global Environment and Implications on Human Health. Elsevier Science, Amsterdam.

ANÓNIMO, 1988. Manual de fertilidad de suelos. Potas & Phosphate Institute. Georgia. USA, 85 p.

AYUSO, L.M. 1995. Utilización de residuos urbanos como enmiendas orgánicas sólidas y líquidas: Valoración agronómica y efectividad frente a enmiendas tradicionales. Tesis Doctoral. CEBAS-CSIC. Murcia.

BARON, R.; BENITEZ, I.C.; GONZALEZ, J.L. 1995 Influencia de la dosis creciente de un abono orgánico en un cultivo de trigo. Agrochimica XXXIX, 5-6; 280-289

CARLSEN, L., LASSEN, P., WARWICK, P. y RANDALL, A. 1994. Radiolabelled humic and fulvic acids: a new approach to studies on environmental fate pollutants. In. Senesi. Mianom, T.M. (Eds.), Humic Substances in the global Environment and Implications on Human Health. Elsevier Science B.V. Amsterdam.

DESCHAUER, H., HARTMANN, R., KÖGEL-KNABER, I. y ZECH, W. 1994. The influence of dissolved organic matter on transport of polycyclic aromatic hydrocarbons in a forest soil under *Pinus sylvestris*. In. Senesi. Mianom, T.M. (Eds.), Humic Substances in the global Environment and Implications on Human Health. Elsevier Science B.V. Amsterdam.

ESCOBAR, 2002, comunicación personal.

FAO/UNESCO. 1994. World Reference Base for Soil Resources. Wageningen/Rome.



FÜHR, F. y SAUERBECK, D. 1967. The uptake of colloidal organic substances by plant roots as shown by experiments with <sup>14</sup>C-labelled humus compounds. P. 73-82. In Report.

FAO/IAEA Meeting, Viena, Pergamon Press, Oxford.

FRÜND, R., K. GÜGGENBERG, K. HAIDER, H. KNICKER, I. KÖGEL-KNABER AND M. SPITELLER. LÜDEMAN 1994. Recent advances in the spectroscopic characterization of soil humic substances and their ecological relevance. Z. Pflanzenernähr. Bodenk. 157: 175-186.

GALLARDO, J.F. 1980. El Humus investigación y ciencia. 46, 8-16.

GRAETZ, H. A. 1997. Suelos y fertilización. Traducido por: F. Luna Orozco. Trillas. México. 80 p.

GROS, A. Y DOMINGUEZ, A., 1992. Abonos guía práctica de la fertilización. 8va edición. Ediciones Mundi-Madrid. 450 p.

HUNCHAK-KARIOUK, K. Y SUFFET, I.H. 1994. Binding of organic pollutants dissolved organic matter in anoxic pore waters. In: Senesi, Mianom, T.M. (Eds.), Humic Substances in the global Environment and Implications on Human Health. Elsevier Science B.V. Amsterdam.

INEGI. Anuario Estadístico Estatal de Coahuila de Zaragoza 2008.

LINEHAN, D.J. 1997. Journal of Soil Science, 28, 369-378.

LÓPEZ, C. R., A. GALLEGOS DEL T., E. PEÑA C., A. REYES L., R. CASTRO F. Y J. F. J. CHÁVEZ G. 2006. Substancias húmicas de origen diverso en algunas propiedades físicas de un suelo franco-arcillo-limoso. TERRA Latinoamericana. Julio-Septiembre. Volumen 24, N° 3. Páginas. 303-310.

LÓPEZ, C. R. 2002. Comportamiento de Substancias Húmicas de Diverso Origen en al Física de un Suelo Limo-Arcilloso y en la Fisiología del Tomate. Tesis Doctoral en

Sistemas de Producción. Universidad Autónoma Agraria “Antonio Narro” Buenavista, Saltillo, Coahuila, México.

MINITAB. 2004. Estadística Práctica. PEARSON EDUCACIÓN, S. A. Ribera del Loira, 28, 28042, Madrid, España.

MUSTIN, M., 1987. Le compost. Ed. Francois Dubusc. París, 954p.

NARRO, F., E. 1994. Física de Suelos. Con Enfoque Agrícola. Editorial Trillas. México. P. 23-28.

NAVARRO PEDREÑO, J., MORAL HERRERO, GÓMEZ LUCAS Y MATAIX BENEYTO., 1995. Residuos orgánicos y agricultura. Universidad de Alicante. Servicio de Publicación. Alicante. España. 108 p.

OADES, J. M. 1984. Soil organic matter and structural stability: mechanism and implications for management. *Plant Soil* 76: 319-337.

OCIO, J. A. Y BROOKES P.C. 1990. *Soil Biologiactal Biochemistry*, 22, 685.

PICCOLO, A. y MBAGWU J.S.C. 1997. Exogenous humic substances as conditioners for the rehabilitation of degraded soils. *Agro-Food-Industry Hi-Tech*. Marzo/Abril 2-4.

PICCOLO, A. AND J. S. C. MBAGWU. 1999. Role of Hydrophobic Components of Soil Organic Matter in Soil Aggregate Stability. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63: 1810-1811.

PRAT, S. y POSPISIL, F. 1959. Humic acids with <sup>14</sup>C. *Biologia Plantarum*. 1, 71-80.

RICE J. A. AND MCCARTHY P. (1988) Comments on the literature of the humin fraction of humus. *Geoderma*. 43, 65-73.

SAMPAT, A. G. (1972). Física de suelos : principios y aplicación. Limusa. 1972. México, D.F. p 83-93.

SCHNITZER, M. AND U. C. GUPTA. 1965. Determination of acidity in soil organic matter. Soil Science Society American Proceeding. 29: 274-277.

SCHNITZER, M. 1990. Selected methods for the characterization of soil humic substances. pp. 65-89. In P. MacCarthy, C.E. Clapp, R.L. Malcolm, P.R. Bloom (Eds.) Húmic substances in oil and crop sciences: Select reading. Proceeding of a symposium by th IHSS, Chicago, Illinois, December 1985.

STEELINK, C. 1985. Elemental characteristics of humic substances In: G.R. Aiken, D.M. McKnight, R.L. Wershaw and P. MacCarthy (Eds.) Húmic substances in oil, sediment, and water, Jhon Wiley & Sons, New York, 457 – 476.

STEVENSON, F.J., 1994. Humus Chemistry: Genesis, Composition, Reactions. Second Edition. Jhon Wiley & Sons, New York.

TISDALL, J. M. AND J. M. OADES. 1982. Organic matter and water-stable aggregates in soils. J. Soil Sci. 33: 141-163.

WALKLEY, A. AND I. A. BLACK. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. Soil Science. 37: 29-38.