

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE AGRONOMIA



®

**EFFECTO DE UN HUMATO DE CALCIO Y FULVATO DE HIERRO
EN LA CALIDAD Y PRODUCCIÓN DE CHILE JALAPEÑO
(*Capsicum annum* L.) Y PIQUIN (*Capsicum annum* L. *aviculare*) Y
EN LA POROSIDAD EN UN SUELO CALCISOL**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE

DOCTOR EN CIENCIAS AGRICOLAS

PRESENTA

M. C. RUBÉN LÓPEZ SALAZAR

Marín, N. L

MAYO DE 2014

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE AGRONOMIA



**EFFECTO DE UN HUMATO DE CALCIO Y FULVATO DE HIERRO
EN LA CALIDAD Y PRODUCCIÓN DE CHILE JALAPEÑO
(*Capsicum annum* L.) Y PIQUIN (*Capsicum annum* L. *aviculare*) Y
EN LA POROSIDAD EN UN SUELO CALCISOL**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
DOCTOR EN CIENCIAS AGRICOLAS**

PRESENTA

M. C. RUBÉN LÓPEZ SALAZAR

Escobedo, N. L

MAYO DE 2014

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE AGRONOMIA



®

**EFFECTO DE UN HUMATO DE CALCIO Y FULVATO DE HIERRO
EN LA CALIDAD Y PRODUCCIÓN DE CHILE JALAPEÑO
(*Capsicum annum* L.) Y PIQUIN (*Capsicum annum* L. *aviculare*) Y
EN LA POROSIDAD EN UN SUELO CALCISOL**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
DOCTOR EN CIENCIAS AGRICOLAS**

PRESENTA

M. C. RUBÉN LÓPEZ SALAZAR

Escobedo, N. L

MAYO DE 2014

CURRÍCULUM VITAE

Rubén López Salazar

Manuel W. González 1873 col. 26 de Marzo

Saltillo, Coahuila, México, 25070

Teléfono Casa: 01-844-417-82-61

Teléfono Celular: 045-811-298-4623

E-mail: technicalsupport@jdmvholdings.com, rlsmorris@hotmail.com,
rlsmorris12@gmail.com

Estado civil: Casado.

Fecha de Nacimiento: 24 de Diciembre de 1983.

Nacionalidad: Mexicano.

Experiencia Profesional

Intercambio internacional con Olds Collage, Alberta, Canadá y experiencia de trabajo en Sundre, Alberta, Canadá por 6 meses.

Prácticas agrícolas en Rincón de Romos, Aguascalientes 2006.

Estancia de trabajo en Tokyo, Japón 10 meses en la empresa Miamonte Junio 2006 - Abril 2007.

Estancia de trabajo en Granada España, Septiembre 2009 – Diciembre 2009.

Actual miembro de la HPTA, USDA.

Educación

Escuela Primaria Anexa a la Normal T.M. 1989 – 1990.

Escuela Secundaria Prof. Humberto Elizalde Jasso T.M. 1995 – 1998.

Instituto de Valle Arizpe Preparatoria. 1999 – 2001.

Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro 2001 – 2006.

Doctorado en ciencias agrícolas en la Universidad Autónoma de Nuevo León
Agosto 2010 – Junio 2013

Cursos y Seminarios

Perfeccionamiento de Inglés, Saltillo, Coahuila, 6 de Febrero de 2002.

4º Simposio Nacional de Horticultura Invernaderos. Torreón, Coahuila, 13 al 15 de Octubre 2004

I Congreso Internacional de Administración. Instituto Tecnológico de Saltillo 24, 25 y 26 de Marzo de 2004.

Manejo de Negocios 25 de Marzo de 2004.

Cuarto Curso y Congreso Internacional de Hidroponía en la Republica Mexicana Toluca, México, del 1 al 3 de Abril 2004.

X Congreso Nacional y III Internacional de Horticultura Ornamental Uruapan, Michoacán, 3 al 7 de Octubre 2005.

X Congreso Nacional y III Internacional de Horticultura Ornamental. Taller “Deshidratación de Plantas Ornamentales”.

X Congreso Nacional y III Internacional de Horticultura Ornamental. Taller “Arreglos Florales”.

English as a Second Language for Agricultura (ESLA 110-111) 120 hr. March 8 – April 15, 2005.

Farm Health and Safety 20 hr. March 11 – April 11, 2005.

INSTITUTIONAL TEST SCORED RECORD. Total Score 453. 23 DE Marzo de 2007.

“Puertas Abiertas” organizado por la Facultad de Ciencias Forestales, UANL en sus instalaciones. Linares, N. L. a 29 de Abril de 2008.

Encuentro Regional de Transferencia de Tecnología de Chile Piquín. Linares, Nuevo León, 22 de Mayo del 2008.

Curso de Capacitación Teórico-Práctico de Nutrición Vegetal y Manejo de Enfermedades en Cultivos Hortícolas, Delicias Chihuahua, Abril 1, 2 y 3 de 2009.

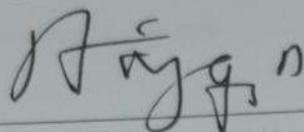
IX Simposium Nacional y II Internacional Producción y Aprovechamiento de Nopal y Maguey, Escobedo, Nuevo León, Mex. 12 y 13 de Noviembre 2010.

X Simposium Nacional y III Internacional Producción y Aprovechamiento de Nopal y Maguey, Escobedo, Nuevo León, Mex. 13 de Noviembre 2011.

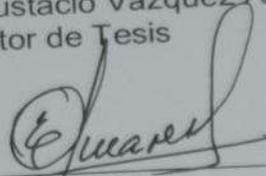
BioMonterrey 2011, Proyecto de Nación en Biotecnología, Desarrollo de Ciencias de la Salud UANL 5-6 Septiembre 2011.

ESTA TESIS FUE REVISADA Y APROBADA POR EL
COMITE PARTICULAR COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE
DOCTOR EN CIENCIAS AGRICOLAS

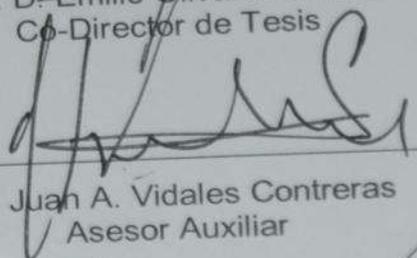
COMITÉ PARTICULAR



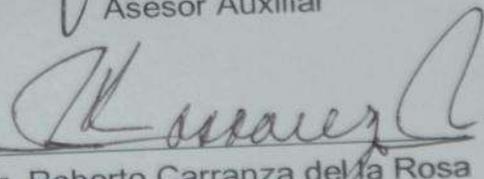
Ph. D. Rigoberto Eustacio Vázquez Alvarado
Director de Tesis



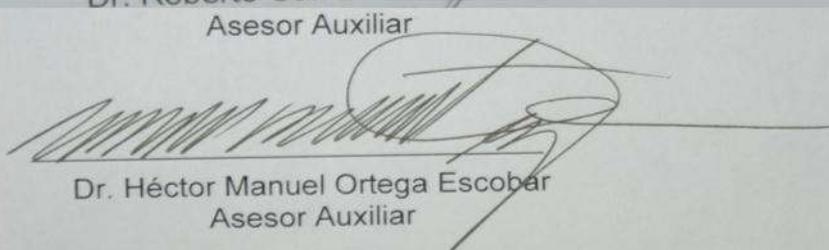
Ph. D. Emilio Olivares Sáenz
Co-Director de Tesis



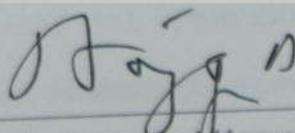
Dr. Juan A. Vidales Contreras
Asesor Auxiliar



Dr. Roberto Carranza de la Rosa
Asesor Auxiliar



Dr. Héctor Manuel Ortega Escobar
Asesor Auxiliar



Ph. D. Rigoberto Eustacio Vázquez Alvarado
Subdirector de Estudios de Posgrado

DEDICATORIA

A mi esposa M. C. Nuyén Díaz Cortes.

Por su amor, confianza y brindarme el regalo más grande que puedo recibir, mi hija Nuyen Mussaret fuente de alegría e inspiración, "*ad fontes*".

A mis padres:

Profra. Nora Salazar Fernández y Dr. Rubén López Cervantes.

A mi hermana:

I. A. H. Nora Zulema López Salazar.

A todos mis tíos, primos y sobrinos.

A mis abuelos:

María Elena Cervantes Rosas (+), Fidencio López Medrano (+), Zulema Fernández Montalvo y Jesús Salazar Villafaña (Sargento Lazo +).

A todos mis amigos.

AGRADECIMIENTOS

A la UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN, FACULTAD DE AGRONOMÍA, por brindarme la oportunidad de superarme día con día.

A CONACYT, por el apoyo para realizar los estudios de posgrado.

CBMG, por el tiempo y ayuda para realizar esta investigación que se llevara a la práctica.

Asesores: Ph. D. Rigoberto E. Vázquez Alvarado, Ph. D. Emilio Olivares Sáenz, Dr. Juan A. Vidales Contreras, Dr. Roberto Carranza del la Rosa, Dr. Manuel Ortega Escobar, por su tiempo y apoyo, como en las revisiones sin menospreciar sus consejos, tanto en lo profesional como en lo personal.

Al departamento de Ciencias del Suelo de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, por brindarme espacio del laboratorio de fertilidad de suelos.

A la M. C. Rosario y Dr. Luis del CIQA por la ayuda en el análisis de los espectros infrarrojos y de nutrimentos.

Al trabajador del vivero Roberto González por ayudarme en el transcurso de la investigación.

INDICE DE CONTENIDO

CAPITULO I

EXTRACCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE ÁCIDOS HÚMICOS Y FÚLVICOS EXTRAIDOS DE LEONARDITA Y ELABORACIÓN DE UN HUMATO DE CALCIO Y FULVATO DE HIERRO

| | |
|--|----|
| RESUMEN | 1 |
| SUMMARY | 2 |
| I. INTRODUCCION | 3 |
| 1.1 HIPÓTESIS | 6 |
| 1.2 OBJETIVOS | 6 |
| 1.3 META | 6 |
| II. REVISIÓN DE LITERATURA | 7 |
| III. MATERIALES Y MÉTODOS | 24 |
| 3.1 Extracción de ácidos húmicos y fúlvicos | 24 |
| 3.2 Solidificación de ácidos húmicos y fúlvicos, humatos de calcio y fulvatos de hierro | 25 |
| 3.3 Cuantificación de grupos funcionales de los ácidos húmicos y fúlvicos | 25 |

| | |
|--|----|
| 3.4 Espectrómetro Infrarrojo: Características y Forma de Uso | 26 |
| IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN | 27 |
| 4.1 Extracción y componentes de ácidos húmicos y fúlvicos | 29 |
| 4.2 Obtención del Humato de Calcio y Fulvato de Hierro Regulando las Condiciones de pH de la Solución | 30 |
| 4.3 Solidificación del Ácido Húmico, Fúlvico, Humatos de Calcio y Fulvatos de Hierro | 31 |
| V. CONCLUSIONES | 39 |
| VI. LITERATURA CITADA | 68 |
| VII. ARTÍCULO: METODOLOGÍA PARA OBTENER ÁCIDOS HÚMICOS Y FÚLVICOS Y SU CARACTERIZACIÓN MEDIANTE ESPECTOFOTOMETRIA INFRARROJA | 46 |

INDICE DE CUADROS

| | |
|--|----|
| Cuadro 1. Acidez total (AT) y grupos funcionales de carboxilo (-COOH) y oxhidrilos (-OH), de las sustancias húmicas extraídas de leonardita. | 29 |
|--|----|

INDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1. Representación hipotética 3D de ácido húmico propuesto por Schulten y Schnitzer. | 27 |
| Figura 2. Representación hipotética 2D y 3D de ácidos húmicos extraídos de leonardita (De quien). | 28 |
| Figura 3. Representación hipotética 2D y 3D de ácidos fúlvicos extraídos de leonardita. | 28 |
| Figura 4. Espectro infrarrojo de ácidos húmicos enriquecidos con nitrato de calcio extraídos de leonardita. | 33 |
| Figura 5. Espectro infrarrojo de ácidos fúlvicos enriquecidos con sulfato ferroso extraídos de leonardita. | 34 |

CAPITULO II

COMPORTAMIENTO DE HUMATO DE CALCIO Y FULVATO DE HIERRO EN LA CALIDAD Y PRODUCCIÓN DEL CHILE JALAPENO (*Capsicum annum* L.) Y CHILE PIQUIN (*Capsicum annum* L. *aviculare*) EN UN SUELO CALCISOL

| | |
|---|----|
| RESUMEN | 60 |
| SUMMARY | 61 |
| I. INTRODUCCION | 62 |
| 1.1 HIPÓTESIS | 65 |
| 1.2 OBJETIVOS | 65 |
| 1.3 META | 65 |
| II. REVISIÓN DE LITERATURA | 66 |
| III. MATERIALES Y MÉTODOS | 77 |
| 3.1 Ubicación del Área Experimental | 77 |
| 3.2 Diseño Estadístico | 77 |
| 3.3 Fertilización aplicada a los tratamientos | 78 |
| 3.4 Lavado de Raíz | 82 |
| 3.5 Captura de Imagen | 83 |

| | |
|---|-----|
| 3.6 Análisis de Imagen | 83 |
| 3.7 Capacidad De Intercambio Catiónico Radicular | 84 |
| 3.8 Determinación de la Concentración de Nutrimientos | |
| Segunda Etapa | 85 |
| 3.9 Rendimiento | 86 |
| 3.10 Determinación de Vitamina C | 86 |
| IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN | 88 |
| 4.1 Primera Etapa Chile Jalapeño | 88 |
| 4.1.1 Chile Jalapeño pH 6 | 88 |
| 4.1.2 Chile Jalapeño pH 7 | 89 |
| 4.2 Primera Etapa Chile Piquín | 89 |
| 4.2.1 Chile Piquín pH 6 | 89 |
| 4.2.2 Chile Piquín pH 7 | 90 |
| 4.3 Segunda Etapa Chile Jalapeño | 91 |
| 4.3.1 Chile Jalapeño pH6 | 91 |
| 4.3.2 Chile Jalapeño pH 7 | 94 |
| V. CONCLUSIONES | 111 |
| VI. LITERATURA CITADA | 112 |

| | |
|---|-----|
| VII. ARTÍCULO: COMPORTAMIENTO DE HUMATO DE HIERRO Y FULVATO DE CALCIO EN LA DISTRIBUCIÓN DE RAÍZ DEL CHILE JALAPEÑO | 126 |
|---|-----|

INDICE DE CUADROS

| | |
|--|----|
| Cuadro 1. Distribución de tratamientos para chile jalapeño y piquín. | 78 |
| Cuadro 2. Fertilización aplicada a los tratamientos de acuerdo a la propuesta de Steiner. | 79 |
| Cuadro 3. Análisis de Fertilidad a 0-30 cm del Suelo Utilizado Para el Experimento, Facultad de Agronomía, Campus Marín. | 81 |
| Cuadro 3a. Variables Físicas a 0-30 cm del Suelo Utilizado Para el Experimento, Facultad de Agronomía, Campus Marín. | 81 |
| Cuadro 4. Diagnóstico de Salinidad y Sodicidad en Extractos de Saturación. | 82 |
| Cuadro 5. Comparación de Medias de las Variables de Chile Jalapeño a pH 6. | 88 |
| Cuadro 6. Comparación de Medias de las Variables de Chile Jalapeño a pH 7. | 89 |

| | |
|---|----|
| Cuadro 7. Comparación de Medias de las Variables de Chile Piquín a pH 6. | 90 |
| Cuadro 8. Comparación de Medias de las Variables de Chile Piquín a pH 7. | 90 |
| Cuadro 9. Comparación de Medias de las Variables de Chile Jalapeño a pH 6. | 91 |
| Cuadro 10. Desviación Oprima Porcentual del Primer Corte de Chile Jalapeño Tratamiento pH 6 Segunda Etapa. | 93 |
| Cuadro 11. Desviación Oprima Porcentual del Segundo Corte de Chile Jalapeño Tratamiento pH 6 Segunda Etapa. | 94 |
| Cuadro 12. Comparación de medias de las variables de chile piquín a pH 7. | 95 |
| Cuadro 13. Desviación Oprima Porcentual del Primer Corte de Chile Jalapeño Tratamiento pH 7 Segunda Etapa. | 97 |
| Cuadro 14. Desviación Oprima Porcentual del Segundo Corte de Chile Jalapeño Tratamiento pH 7 Segunda Etapa. | 98 |

CAPITULO III

COMPORTAMIENTO DE UN HUMATO DE HIERRO Y FULVATO DE CALCIO SOBRE LA POROSIDAD DE UN SUELO CALCISOL

| | |
|---|-----|
| RESUMEN | 138 |
| SUMMARY | 139 |
| I. INTRODUCCION | 140 |
| 1.1 HIPOTESIS | 143 |
| 1.2 OBJETIVOS | 143 |
| 1.3 META | 143 |
| II. REVISIÓN DE LITERATURA | 144 |
| III. MATERIALES Y METODOS | 167 |
| 3.1 Ubicación del Área Experimental | 167 |
| 3.2 Manejo del cultivo | 167 |
| 3.3 Obtención de muestra | 169 |
| 3.4 Impregnación y solidificación de la muestra | 169 |
| 3.5 Cuantificación de la porosidad por análisis de imagen | 170 |
| 3.6 Análisis de Imagen | 170 |

| | |
|---|-----|
| IV. RESULTADOS Y DISCUCION | 172 |
| V. CONCLUSIONES | 179 |
| VI. LITERATURA CITADA | 180 |
| VII. ARTÍCULO: COMPORTAMIENTO DE UN HUMATO DE CALCIO Y FULVATO DE HIERRO EN LA POROSIDAD DE UN CALCISOL | 189 |

INDICE DE CUADROS

| | |
|--|-----|
| Cuadro 1. Distribución de tratamientos para chile jalapeño. | 168 |
| Cuadro 2. Porosidad total de la muestras pH 6 en mm ² . | 173 |
| Cuadro 3. Porosidad total de la muestras pH 7 en mm ² . | 176 |

INDICE DE FIGURAS

| | |
|---|-----|
| Figura 1. Posibles secciones procedentes de un cubo de suelo | 161 |
| Figura 2. Posibles secciones tangenciales procedentes de un cubo de suelo. | 161 |
| Figura 3. Secciones tangenciales. | 162 |
| Figura 4. Revestimientos de naturaleza arcillosa. | 163 |
| Figura 5. Revestimientos de naturaleza orgánica. | 164 |

| | |
|--|-----|
| Figura 6. Llenado denso incompleto. | 164 |
| Figura 7. Imagen original y binaria de porosidad total de la muestras pH 6. | 174 |
| Figura 8. Imagen original y binaria de porosidad total de la muestras pH 7. | 177 |

CAPITULO I

EXTRACCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE ÁCIDOS HÚMICOS Y FÚLVICOS APARTIR DE LEONARDITA Y ELABORACIÓN DE UN HUMATO DE CALCIO Y FULVATO DE HIERRO

RESUMEN

Los extractos orgánicos en la actualidad tienen gran aceptación por los productores agrícolas, fundamentalmente por su costo y el éxito de sus aplicaciones en los cultivos. Con el fin de obtener un compuesto orgánico-mineral o humato como alternativa para eficientar el uso de los nutrientes a los cultivos, se recolectó un mineral fósil orgánico de una mina, en laboratorio se extrajeron las fracciones de ácido húmico (AH) y fúlvico (AF), se ajustó el pH de estos ácidos con fertilizantes químicos. Para los ácidos húmicos y fúlvicos se manejó un pH de 6, 7, 8 y 4, 6, 7 respectivamente y finalmente se solidificaron para la caracterización de los grupos funcionales de estos ácidos; se utilizó un espectrómetro de luz infrarroja (IR). Los resultados muestran que los ácidos húmicos y fúlvicos presentan grupos funcionales similares pero en diferente cantidad, las mezclas orgánico-minerales de AH y AF mostraron un comportamiento similar en adsorción del elemento incorporado, sin embargo el AH y AF ambos con pH 7 presentaron la mayor adsorción del Ca y Fe, esto se debe a que son compuestos pH dependientes y la formación de agrupamientos se debe a las reacciones de intercambio catiónico dada por los radicales libres.

Palabras clave: orgánico-mineral, extractos orgánicos, grupos funcionales.

SUMMARY

Organic extracts currently have wide acceptance by farmers mainly because of cost and success of its applications in crops. In order to obtain an organic-mineral or humate as an alternative for efficient crop nutrients, an organic fossil mineral was collected of a mine, and in the laboratory was extracted the fractions of humic acid (HA) and fulvic (FA). After extraction from these acids the pH was adjusted using chemical fertilizers. The humic and fulvic acids were managed at the following pH levels: 6, 7, 8 and 4, 6, 7 respectively and finally solidified. For the characterization of the functional groups of these acids was used infrared spectrometer (IR). The results show that humic and fulvic acids have similar functional groups but different amount. The organic mineral mixture of HA and FA showed similar behavior in component adsorption, however the HA and FA at pH 7 showed the highest Ca and Fe adsorption, this is because the compounds are pH dependent and complex formation is due to the cation exchange reaction given by free radicals.

Keywords: organic-mineral, organic extracts, functional groups.

I INTRODUCCIÓN

Los términos de materia orgánica del suelo y humus, han tenido diferente interpretación entre agrónomos, químicos y biólogos, los que los interpretan con diferente perspectiva. En el glosario de términos de la Ciencia del Suelo mencionan que la materia orgánica se define como la fracción orgánica de los suelos, exclusiva a residuos de plantas y animales no descompuestos y se considera sinónimo de humus. Sin embargo, otras definiciones de materia orgánica en el suelo se han utilizado por numerosos autores; Schnitzer (2000), se refiere como la suma total de carbono orgánico que contienen sustancias en el suelo, que se compone de una mezcla de residuos vegetales y animales en diferentes etapas de descomposición, sustancias sintetizadas microbiológicamente y/o químicamente a partir de los productos de degradación y los cuerpos de microorganismos vivos, muertos y sus restos en descomposición.

Conceptualmente el componente orgánico del suelo puede ser definido como un conjunto de materia orgánica viva y muerta. La materia orgánica viviente está representada por raíces de las plantas, animales del suelo y la biomasa microbiana; la materia orgánica muerta se forma por descomposición química y biológica de los residuos orgánicos. En la materia orgánica muerta se puede diferenciar el material inalterado, en los que la morfología del material original todavía existe, mientras que la alteración de los productos transformados es también llamado humus. Generalmente el humus del suelo se define como una mezcla de compuestos oscuros, coloidales orgánicos polidispersados con peso molecular alto y relativamente resistente a la descomposición (Ayuso *et al.*, 1996).

Para la caracterización y propósitos funcionales, la materia orgánica generalmente se subdivide en diferentes fracciones o compartimentos. Los enfoques para el fraccionamiento pueden ser ampliamente clasificados como químicos, físicos y biológicos o bioquímicos. Además, algunas características morfológicas también se utilizan para distinguir el desarrollo de diferentes formas de humus en los ecosistemas terrestres. La materia orgánica es un material heterogéneo y complejo en un continuo cambio, hasta la fecha no se conoce ningún método de fraccionamiento para caracterizar adecuadamente las tasas de descomposición y su rotación en el suelo.

En general, el humus se distingue entre sustancias no húmicas y húmicas, Las sustancias no húmicas comprenden compuestos que pertenecen a las clases bien conocidas de la bioquímica, tales como aminoácidos, proteínas, hidratos de carbono, lípidos, lignina, ácidos nucleicos, hormonas, pigmentos y una variedad de ácidos orgánicos. Las sustancias húmicas se subdividen en ácidos fúlvicos, ácidos húmicos y huminas residuales; las huminas son la fracción insoluble de las sustancias húmicas, y los ácidos húmicos la fracción soluble en medios alcalinos y medios ácidos en $\text{pH} > 2$ aunque no en las condiciones ácidas fuertes el $\text{pH} < 2$ y ácidos fúlvicos es la parte soluble en condiciones alcalinas y ácidas (Hayes *et al.*, 1989)

Los métodos de separación químicos se basan principalmente en la solubilidad y la afinidad de ciertos compuestos orgánicos de carbono en diferentes disolventes o soluciones de extracción. La gama de soluciones con agua y disolventes polares y no polares pueden ser alcoholes, acetonitrilo, acetona y hexano, para soluciones con sales inorgánicas con; KCl y K_2SO_4 , ácidos, bases y agentes quelatantes.

La solución de extracción más eficaz y de uso común es NaOH y KOH, la solución extraída con esta, se separa más eficientemente por precipitación selectiva, afinidad disolvente, cromatografía, electroforesis y técnicas de exclusión de tamaño. Alternativamente, los componentes estructurales específicos y grupos funcionales de carbono orgánico pueden ser identificados y medidos mediante la aplicación de técnicas tales como infrarrojos (IR), espectroscopia ultravioleta o resonancia magnética nuclear (RMN).

1.1 HIPÓTESIS

- Los ácidos húmicos y fúlvicos como productos de la leonardita, se pueden extraer y caracterizar.
- El pH afecta la elaboración del humato de calcio y fulvato de hierro, por lo que su regulación mejorará la producción bajo condiciones de laboratorio.

1.2 OBJETIVO

- Extracción y caracterización de ácidos húmicos y fúlvicos a partir de leonardita
- Elaborar y caracterizar un humato de hierro y fulvato de calcio en dos distintos pH y dos concentraciones.

1.3 META

Obtener la descripción del ácido húmico y fúlvico con el uso de la espectrometría infrarroja.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

Los ecosistemas terrestres representan un complejo proceso heterogéneo de reacciones. El carbono (C) es más interactivo, donde hasta 67% de las 1500 Gt de C orgánico del suelo están presentes entre 20 y 100 cm de profundidad en el suelo. Es la formación natural cuya composición y características reflejan las etapas de la evolución de la vida en la Tierra, esta es la materia natural y acumulada de los resultados de una acción combinada de diversos factores formadores, tales como organismos, clima, plantas, animales y tiempo; por lo tanto, las características del suelo son un recordatorio peculiar sobre los factores ambientales que controlan la formación de este. El C orgánico del suelo se encuentra en la materia orgánica (MO) y se compone de una mezcla heterogénea de compuestos orgánicos de diversos orígenes (Dong *et al.*, 2006). En el subsuelo la materia orgánica se asocia principalmente con fases minerales y ambas forman complejos orgánico-minerales, la formación de estos complejos protegen a la MO de la degradación, sin embargo, los suelos no están hechos solo de minerales o sustancias orgánicas, estos dos componentes interactúan entre si y por lo tanto controlan la química de las reacciones del suelo; donde las interacciones son importantes, pero en especial en los suelos que reciben o acumulan grandes cantidades de sustancias orgánicas (Juneta *et al.*, 2013; Tikhova *et al.*, 2001).

El término humus, se utilizó en la antigüedad para hacer referencia a la totalidad del suelo. Posteriormente se ha empleado como sinónimo de materia orgánica, mientras que en la actualidad y como ya se ha mencionado, hace referencia a una fracción de dicha MO que engloba a un grupo de sustancias difícilmente clasificables (Berthelin *et al.*, 2006).

Las formas de humus pueden ser la primera herramienta para evaluar cualitativamente la renovación de la MO en los suelos (Berthelin *et al.*, 2006), la composición de humus es de gran importancia en la formación de la estructura del suelo junto con su mineralogía, tamaño y composición de partículas y cationes intercambiables como tales, las cuales deben estar relacionadas con las existencias de C orgánico que un suelo puede almacenar, las características de la MO afectan su estabilidad y en general a los factores de formación del suelo. La variabilidad de las formas de humus reflejan las diferentes velocidades de degradación de la MO en diferentes entornos, debido a la relación entre las formas de humus y la degradación de la materia orgánica, donde muchos autores han investigado los efectos de la vegetación y la biota del suelo en la aparición de formas de humus en varios entornos; la calidad de MO u otra forma de desarrollo de humus básicamente depende de los mismos factores que afectan a la formación del suelo (clima, relieve, organismos, material parental y tiempo). La influencia de las sustancias húmicas (SH) es agronómicamente valiosa sobre la formación de la estructura y propiedades físicas favorables de suelos, está determinada por su interacción con la parte mineral y en gran medida depende de la composición mineralógica y tamaño de partícula, así como en la estructura y tamaño de las moléculas de los compuestos de humus de los suelos, la materia húmica continuamente se está formando en los suelos y al mismo tiempo se está degradando (Aronov *et al.*, 1968; Jezierskit *et al.*, 2000).

Las SH son moléculas electrolíticas y se componen de ácidos húmicos (AH), ácidos fúlvicos (AF) y huminas residuales (HR). A las cuales se les define como macromoléculas orgánicas con una estructura química, compleja, distinta y estable, la

cual proviene de la degradación de plantas y animales debido a la actividad enzimática de microorganismos y metamorfismo orgánico (Sutton y Sposito, 2005). Estas macromoléculas representan la fracción orgánica del suelo más importante por su actividad en procesos físicos, químicos y biológicos. Los AH son solubles en medios alcalinos aunque no las condiciones de ácidas fuertes si se tiene un $\text{pH} < 2$, los AF son solubles en condiciones ácidas y alcalinas, a diferencia de las HR que son insolubles. La mayor parte de los estudios acerca de las sustancias húmicas se han llevado a cabo sobre las fracciones húmicas y fúlvicas, siendo las huminas las que se han estudiado en menor extensión (Picolo, 2002; Sutton y Sposito, 2005; Flores-Céspedes *et al.*, 2006). Las HR forman el 50% o más de la MO del suelo, esta constituida por ácidos húmicos unidos a la fracción mineral del suelo, dichos ácidos difícilmente pueden separarse de ella; así como también las SH de alta condensación y con un contenido de C superior al 60%. Por otro lado, los AH y AF son más activos tanto química como geológicamente; la solubilidad de los AH en la concentración de electrolitos es baja con el aumento del pH, a un pH de 3 y 8.5 se disuelve alrededor del 80 % y cuando el pH es > 8.5 el 20 % restante. La absorción de AH y AF en las células de la biomasa depende fuertemente del pH, aumenta de forma sigmoideal con la disminución del pH en el rango de 2 a 10, este comportamiento se explica en términos de interacciones hidrofóbicas entre la biomasa y los AH y AF (Moura *et al.*, 2007). La clasificación de las tres fracciones no representa tres tipos distintos de moléculas orgánicas, los AF tienen el peso molecular más bajo, contienen más oxígeno que carbono y nitrógeno que los AH y HR. Los grupos funcionales que contienen oxígeno (CO_2H , OH, C = O) tienen una tasa por unidad de peso más alta en AF que en AH y HR (Hayes *et al.*, 1989;

Stevenson, 1982), esto es debido al hecho de que las SH contienen diversos tipos de grupos funcionales cuyas capacidades complejantes de metal varían, suelen incluir un esqueleto de moléculas aromáticas alquilo con grupos funcionales, como los ácidos carboxílicos, hidroxilo fenólico y grupos quinona unidos a ellos (Peuravuori *et al.*, 2006; Chen *et al.*, 2009).

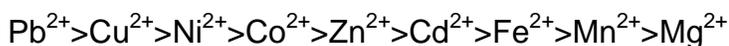
Giasuddin *et al.* (2007), señalan que las SH son comúnmente de rangos de peso molecular que va de varios cientos a decenas de miles con una variación de color amarillo poco profundo a marrón o negro. El AH y AF tienen la misma fuente de origen y son muy similares en estructura y contenido elemental. La principal diferencia es el tamaño molecular del AF es menor, lo que proporciona un aumento de solubilidad en agua a lo largo del intervalo de pH. Una descripción alternativa para la estructura macromolecular de las SH, se define como asociaciones supramoleculares relativamente pequeñas, agrupadas básicamente por interacciones hidrofóbicas y puentes de hidrógeno (Canellas *et al.*, 2008). Estas sustancias están presentes de forma natural como residuos orgánicos en los suelos y contribuyen en los procesos físicos directos o indirectos en el crecimiento vegetal, la adaptabilidad al medio ambiente, mejoran la estabilidad de los agregados del suelo, absorción de nutrientes así como el metabolismo de carbono (Moros *et al.*, 2008). Hay evidencia que los AH están dotados con funciones similares a las auxinas, propiedad que también caracteriza a los AF. Basado en este concepto de moléculas bioactivas, estas forman parte de la estructura supramolecular de las SH relacionadas con sus efectos similares a las hormonas en el desarrollo de la raíz (Zandonadi *et al.*, 2007).

Los efectos hormonales en las plantas han sido descritos dependiendo del origen de las SH, residuos orgánicos y el compost de lombriz. Las SH son macromoléculas poli-electrolíticas que juegan un papel vital en el ciclo global del carbono y del nitrógeno, así como en la movilidad y el destino de los nutrientes de las plantas y contaminantes ambientales.

La evidencia sugiere que la complejación del metal con inorgánicos y/o ligandos orgánicos en el suelo puede tener una influencia en la movilidad y la biodisponibilidad de los metales para los organismos del suelo y plantas. La cantidad y fuerza de la formación de complejos con metales no parecen estar relacionados con el peso atómico, número atómico, radio iónico o el radio hidratado del metal retenido. Esto es debido al hecho de que las SH contienen varios tipos de grupos funcionales cuyas capacidades complejantes de metales varían considerablemente.

Las SH están vinculadas a los componentes minerales a través de diversas interacciones fisicoquímicas que se mezclan con otros compuestos de diferente naturaleza. La capacidad para formar complejos con macro y micronutrientes catiónicos dependen de su contenido de grupos funcionales donadores de electrones. Cualquiera de los enlaces tales como puentes de agua, atracción electrostática debido a la capacidad de intercambio de cationes o enlaces fuertes que implican la coordinación con los grupos individuales o formación de estructuras de anillo carboxilo, alcohol y grupos amino, estos pueden formar diferentes tipos de enlaces, lo cual depende del grado de saturación de estos; los puentes más débiles juegan un papel importante cuando la saturación del elemento es mayor.

Las formaciones de más de un enlace entre el metal y una molécula orgánica, por lo general resulta en una mayor estabilidad del complejo. La estabilidad del complejo órgano-metálico depende del número de átomos que forman un enlace con el ion metálico, el número de anillos que se forman, la naturaleza, la concentración del ion metálico y el pH. El orden de estabilidad de los complejos formados entre los metales y SH se ha determinado a través de la valoración potenciométrica y sigue la serie Irwing-Williams la que es como sigue:



Por otro lado, a un valor de pH 5 no muestran grandes diferencias en la resistencia de las uniones entre las SH y metales tales como Ca, Mg, Mn, Co, Ni y Zn, mientras que Pb, Cu y Fe son más fuertemente unidos; este comportamiento indica que a diferentes valores de pH, se forman complejos metal-húmicos de diferente estabilidad. Debido a la heterogeneidad de las SH, como su peso molecular, contenido de grupos funcionales, variedad de sitios de unión y cambios en la conformación de estas macromoléculas (como el pH y la concentración de sal), siendo estas condiciones muy factibles para provocar desviaciones en el conocimiento.

La importancia de las formas de humus, la necesidad de su clasificación y extracción es reconocida desde los inicios de la ciencia del suelo (Bonifacio *et al.*, 2011). La síntesis de las SH ha sido objeto de especulación durante muchos años. Se distinguen los mecanismos líticos (que consideran la lisis de las paredes celulares, proteólisis, degradación de la lignina, transformación de polifenoles y otros componentes orgánicos), también mecanismos de melanización que incluyen la

incorporación de nitrógeno y oxígeno junto con la reacción de Maillard: produciendo la condensación de hidratos de carbono en presencia de nitrógeno del grupo amino, la aglomeración de ácidos polifenoles y aminos en un medio oxidante.

Schnitzer (2000) reportó las siguientes cuatro hipótesis sobre la formación de sustancias húmicas:

Deterioro de material vegetal: Ciertas fracciones de los tejidos vegetales, particularmente materiales leñosos, una proporción ligera se descomponen (sólo superficialmente) en el suelo para formar sustancias húmicas; la naturaleza de este "humus heredado" es por lo tanto fuertemente influenciado por la naturaleza del material de la planta original; donde la primera etapa de la humificación proporciona sustancias húmicas de alto peso molecular, que luego pueden descomponerse en sustancias más ligeras y finalmente en CO_2 y H_2O .

Polimerización química: Los materiales vegetales se descomponen en moléculas pequeñas que se utilizan como fuente de energía y de carbono por los microorganismos; estos microorganismos sintetizan fenoles y aminoácidos que se polimerizan en sustancias húmicas, en este caso la naturaleza del material original no tiene ningún efecto sobre el tipo de sustancia que se forma.

Autólisis celular: Los fragmentos resultantes de la autólisis de microbios y células de plantas (amino-azúcares, ácidos, fenoles y otros compuestos aromáticos) se condensan y se polimerizan a través de radicales libres.

Síntesis microbiana: Los microbios usan tejidos de la plantas como fuente de carbono y energía para sintetizar materiales orgánicos intercelulares de alto peso

molecular, estas sustancias se liberan en el suelo, representen la primera etapa de la humificación y luego pueden someterse a la degradación microbiana extracelular produciendo moléculas más ligeras.

El concepto de la polidispersidad de las SH ha tenido aceptación tradicional, pero también ha habido una suposición generalizada de que las sustancias son polímeros o macromoleculares en el modo de otras macromoléculas biológicas de la naturaleza, tales como proteínas, polisacáridos, ácidos nucleicos y lignina. Esta opinión ha sido racionalizada por la hipótesis de que la síntesis de humus se basa en que la lignina o las teorías polifenólicas, se basa en la suposición de que la polimerización progresiva del material húmico se lleva a cabo a través de una unión covalente y que los procesos son a menudo mediados por las enzimas del suelo. Esta representación ha fomentado en la comunidad científica la percepción de que las SH son polímeros macromoleculares (aunque heterogéneos) donde las unidades monoméricas se acumulan progresivamente en polímeros de alto peso molecular por condensación al azar y los procesos de oxidación.

Sin embargo, a pesar de que la química de estos monómeros o estructuras de red ha variado, dependiendo de los materiales húmicos y/o las técnicas fisicoquímicas que proporcionan los datos experimentales, el concepto estructural macromolecular, basado en procesos de polimerización covalentes, no ha sido cuestionado a través de los datos experimentales que se han aportado. En el modelo hipotético de la formación de humus, la aleatoriedad de la polimerización covalente de monómeros representa la gran polidispersidad observada de macromoléculas húmicas. Por otra parte, los múltiples plegamientos conformacionales que una cadena polimérica, ya sea lineal o

ramificada asumiría en el ambiente del suelo, proporcionaría una explicación plausible para su resistencia a la degradación microbiana y el tiempo de presencia observado para los componentes húmicos del suelo.

Los AH son compuestos naturales que se encuentran como componentes de la turba, lignito y sapropel (Sivakova *et al.*, 2010), son un material orgánico rico en carbón, originado de la combustión incompleta de combustibles fósiles, de la vegetación y del intemperismo de rocas de grafito ricas en carbón. La oxidación de los carbones en la naturaleza es un proceso complejo de múltiples etapas de reacciones heterogéneas del estado de la masa. Es bien sabido que el proceso comienza con la oxidación de la superficie y la formación de un álcali-soluble, ácidos húmicos y una pequeña cantidad de dióxido de carbono, agua, agua ácida y sustancias solubles. El proceso termina con la formación de productos solubles de bajo peso molecular, dióxido de carbono y agua.

Las SH derivadas de leonardita o turba están compuestas de estructuras cíclicas, principalmente aromáticas, son de altos pesos moleculares y aunque de orígenes diferentes, comparten un tipo común de estructura. La leonardita se utiliza como fuente principal de las sustancias húmicas, que se preparan por el procedimiento de extracción a una muestra de leonardita.

La investigación se ha centrado en la extracción de SH a partir de leonardita por tres métodos: extracción alcalina, extracción ácida y fermentación de microorganismos. En comparación con el método de extracción alcalina, las SH extraídas por el método ácido contienen más impurezas y el método de fermentación por microorganismos requiere más tiempo de reacción, provocando un menor rendimiento en la extracción del ácido; por tanto, el uso de los métodos de extracción ácida y mediante

microorganismos se limita solamente a la fase de laboratorio. En la actualidad, la extracción alcalina de SH a partir de leonardita se utiliza ampliamente (Yuan *et al.*, 2006; Zou *et al.*, 2006; Yang *et al.*, 2011).

El procedimiento de extracción es el paso previo en relación a la caracterización de las SH. Hayes *et al.* (1989), proponen varios procedimientos de extracción con soluciones alcalinas y complejos de soluciones salinas, generalmente NaOH, aunque también KOH, de 0.1 a 0.5 M, en relación peso: volumen 1:2 a 1:5, es la técnica más frecuente para extraer la materia orgánica del suelo. Además se trata del procedimiento más utilizado para la extracción de sustancias húmicas de tipo comercial. La Sociedad Internacional de Sustancias Húmicas recomienda un procedimiento estándar, basado en un tratamiento con 0.1 M de NaOH a temperatura de 26 °C, se puede decir que con esta técnica se extraen dos terceras partes de la MO (Yuan *et al.*, 2006). Las características estructurales de las SH son poco conocidas, los análisis químicos de las muestras proveen información limitada y por tanto se desconocen los factores que influyen en el proceso de extracción. Existen varios métodos para evaluar la estabilidad de la materia orgánica en detalle y son en base a métodos químicos, adecuados tanto para horizontes humificados y minerales orgánicos, ofrecen información importante; en los últimos años se ha puesto mucho énfasis a los mecanismos que influyen en la estabilidad de la MO; además de la resistencia intrínseca de los compuestos orgánicos, la estabilidad se ve reforzada por las interacciones entre los compuestos orgánico-minerales y por la inclusión de la materia orgánica en los agregados del suelo.

En un principio, el uso de la fertilización orgánica frente a la inorgánica se propuso disminuían las pérdidas por lixiviación de nutrientes en las aguas superficiales

y subterráneas. Por lo tanto, el efecto combinado de la materia orgánica y mineral para producir fertilizantes orgánico-minerales pareció más ventajoso, con el fin de suministrar los nutrientes necesarios en las primeras etapas de desarrollo de la planta y para minimizar los costos de los materiales respetuosos con el medio ambiente (González *et al.*, 1992).

Una alternativa para eficientar los nutrimentos a los cultivos consiste en la combinación con compuestos inorgánicos. La aplicación de SH como una enmienda orgánica del suelo en combinación con otros materiales, resulta en un aumento significativo en el crecimiento de la planta y rendimiento de los cultivos, mediante la mejora de las propiedades hidrofísicas y disponibilidad de nutrimentos de los suelos. Los complejos orgánico-minerales permiten a las plantas superar los efectos adversos de la salinidad del suelo, mejoran la agregación, aireación, permeabilidad, capacidad de retención de agua, absorción de micronutrientes, disponibilidad y finalmente la disminución en la absorción de algunos elementos tóxicos (Ryabova, 2010).

El papel positivo de los materiales húmicos en la agricultura ha sido ampliamente aceptado en las últimas décadas; extractos ricos en nitrógeno actúan como fertilizantes y estimuladores de crecimiento. Cuando se incorporan a los suelos, las sustancias húmicas mejoran las propiedades físicas, fertilidad y las condiciones de humedad del suelo, también la nutrición de elementos traza a través de la quelación con iones metálicos (Schnitzer and Khan, 1978). Otro parámetro de importancia fundamental además del alto contenido de minerales, es la biodisponibilidad de los metales con respecto al ambiente químico del suelo. Cuando forman complejos, polímeros-húmicos aumentan la estabilidad de los iones de metal debido a las

estructuras químicas particulares de los complejos metal-húmicos desarrollados (Piccolo *et al.*, 1997).

Las interacciones entre las SH y los iones metálicos se han descrito como de intercambio de iones, superficie de adsorción, capacidad de quelación, coagulación y reacciones de peptización. El grado de unión a polímeros húmicos de metal puede variar con el tamaño y la configuración del material húmico, condiciones de pH, fuerza iónica de la solución, así como las propiedades químicas del metal y la abundancia relativa de metal y las sustancias húmicas (Kalinichev and Kirkpatrick, 2007).

La capacidad de las SH para formar un complejo con un metal puede ser atribuido a su alto contenido de oxígeno que contienen los grupos funcionales, incluyendo -COOH, fenólico, alcohol-enólico, -OH y C=O. El nitrógeno y grupos funcionales que contienen azufre también pueden estar involucrados en la retención del metal (Canellas *et al.*, 2008). Sin embargo, los dos últimos grupos funcionales están presentes en pequeñas cantidades y su contribución a los complejos de sustancias orgánico-mineral es menos pronunciada. Los complejos metal-orgánicos se producen ya sea por la formación de complejos relativamente débiles por medio de reacciones de intercambio catiónico o por la formación de complejos formados en su esfera interna fuertemente unidos a través de las reacciones de intercambio o complejos (Flores-Céspedes *et al.*, 2006).

Se ha despertado un gran interés en la producción de fertilizantes húmicos en todo el mundo, la experiencia con el uso de fertilizantes húmicos en la agricultura ha permitido producir humatos de varias materias primas orgánicas, a partir de turba,

leonardita y otro tipo de lignitos (Sivakova *et al.*, 2010). Además de los nutrimentos, los acondicionadores de varios regímenes especiales de la producción resultó en una gran variedad de humatos destinados a diferentes tareas: la fertilización, recuperación de suelos degradados, absorción de sustancias tóxicas y estimuladores del crecimiento de plantas.

Los humatos derivados de fuentes como el carbón, turba, sedimentos, residuos orgánicos y algunos otros componentes son acondicionadores de suelo efectivos. La influencia positiva de las SH en el crecimiento y desarrollo fue descubierto a finales del siglo XIX y más tarde apoyado en las obras clásicas de Kononova (1966). Diferentes humatos han mostrado mejorar el crecimiento y desarrollo de las plantas, aumentando la resistencia de estas a condiciones ambientales desfavorables, actuando de manera similar a las SH naturales. En campo y laboratorio con diferentes pruebas de SH y diferentes especies de cultivos, han demostrado que los humatos de sodio, potasio y amoníaco, estimulan significativamente la germinación de semillas y crecimiento de plantas, aumentan la absorción de agua, respiración, longitud y biomasa de los brotes y raíces. Se atribuye una mayor eficiencia estimulante a los humatos, en el crecimiento de la planta en comparación a las SH en el suelo *in vivo*. Más a menudo se atribuye tanto a su estructura química en particular o de influencia fisiológica. Del mismo modo, un número de estudios llevados a cabo utilizando soluciones de nutrientes o sustratos inertes han demostrado la capacidad de la planta para asimilar micronutrientes a partir de complejos de metal-húmico (Ulanov, 1993; Chukov, 2001; Chen *et al.*, 2009)

Los humatos son modificaciones de las partículas orgánicas de la materia prima inicial. En su producción debido a una serie de procesos tales como la ruptura de las

interacciones orgánico-minerales, hidrólisis y oxidación, hasta esta parte todavía pertenecen a la clase de compuestos de SH. Las SH tienen algunos efectos fisiológicos en las plantas como mitigadores del proceso de respiración lo que tiene impacto en la síntesis de proteínas que afectan las reacciones metabólicas las cuales actúan como sustancias de tipo hormonal (Pizzeghello *et al.*, 2001). Autores como Rauthan y Schnitzer, 1981; Gorovaya *et al.*, 1995 han reportado que las SH influyen en el crecimiento de la planta debido a su influencia indirecta sobre las propiedades del suelo, como un aumento de la agregación, aireación, permeabilidad, absorción de nutrientes y mejorar la distribución de iones metálicos.

Los humatos son tan importantes en la producción de cultivos que usualmente todas las prácticas modernas de manejo del suelo están diseñados para aumentar su contenido. La necesidad de mantener una concentración adecuada de material orgánico-mineral en suelos productivos, ha sido reconocida por los agricultores por muchos años. La industria de los fertilizantes ha subrayado desde hace tiempo la importancia de mantener el contenido húmico de los suelos para asegurar una buena productividad.

Muchos autores coinciden que el aumento de los rendimientos en producción y una agricultura más rentable, es debido a la aplicación de humatos como enmiendas orgánicas, podría ser también relacionada con la mejora de las propiedades físicas y químicas del suelo. Diferentes autores han informado de aplicaciones en el suelo de humatos derivados del carbón para aumentar la conductividad hidráulica, así como la cantidad de agregados estables aumentan la capacidad de retención de agua en el suelos. Por lo tanto, los suelos que contienen cantidades relativamente grandes de

material orgánico-mineral pueden resistir más eficaz y eficientemente las sequías y producir mejores rendimientos cuando la lluvia o riego es insuficiente. Se mejoran la porosidad y disminuyen la densidad aparente de algunos suelos tropicales degradados; también se mejoran la estabilidad de agregados y también se reducen los efectos de desagregación de los ciclos de humedecimiento y secado de los suelos semiáridos y áridos (Chen and Aviad, 1990).

La bondad de los humatos para equilibrar o regular la capacidad de retención de agua o su contenido, es probablemente la característica más significativa en la medida que la agricultura se refiere, ya que desde un punto cuantitativo el agua es el producto más importante derivado del suelo hacia un vegetal. En conjunción con este efecto regular el agua, los humatos poseen capacidades de intercambio iónico altas y es esta propiedad que hace posible una mejor retención y utilización de fertilizantes mediante la prevención de lixiviación excesiva lejos de las zonas de la raíz y en última instancia la liberación de ellos a las raíces en crecimiento, según sea necesario.

Además de su influencia en las propiedades físicas y químicas del suelo, los humatos así como otros materiales orgánicos humificados, influyen en las propiedades microbiológicas, aumentan el crecimiento y la actividad microbiana. Al ser añadido a un medio selectivo, los humatos podrían aumentar el crecimiento de una amplia gama de grupos taxonómicos y funcionales de las bacterias del suelo. Como posible mecanismo se planteó la propuesta de que las partículas orgánico-minerales promueven la modificación de la actividad y el crecimiento celular a través de la influencia sobre la permeabilidad de la membrana celular o en la disponibilidad de nutrientes (Chen and Aviad, 1990).

Una influencia positiva de los humatos derivados del carbón sobre el crecimiento de las plantas en la germinación de semillas ha sido demostrada por numerosos estudios. La inmersión de las semillas en soluciones de humatos ha demostrado que aumenta la germinación, longitud y biomasa de los brotes y raíces, juegan un papel importante en el metabolismo del fósforo y estimulando enzimas en las plantas (Ulanov, 1993). Varias fracciones orgánico-minerales son a menudo clasificadas de acuerdo a su relación carbono:nitrógeno. Esta relación indica el grado de humificación y están influenciadas por los procesos bioquímicos particulares involucrados en su formación, por ejemplo, los promedios de relación de 10 a 1 en las regiones más húmedas del mundo, siendo considerablemente mayor en las regiones semiáridas, con una relación de 14 a 1.

Las propiedades químicas y estructurales de la materia orgánica disuelta en el suelo y sus derivados a partir de diferentes materiales se han caracterizado con diferentes métodos, tales como el rendimiento de exclusión por tamaño, cromatografía, absorbancia UV, espectroscopia de fluorescencia, espectroscopia infrarroja, ^1H , ^{13}C y resonancia magnética nuclear. Entre estos métodos, el IR es la técnica más útil en el reconocimiento de estructuras químicas, porque las señales de los espectros son directamente en relación con los grupos químicos funcionales. Los métodos de espectroscopia cuantifican la composición química que forman las capas de los AH y AF, el método más acertado es el de infrarrojo cercano. La espectroscopia infrarroja (IR) es de precisión y desarrollado en la actualidad para caracterizar las SH y sus fracciones: AH y AF. Los espectros IR de SH se caracterizan por su simplicidad, en la comparación con los espectros de la estructura definida de compuestos puros (Moros

et al., 2008). Esta sencillez resulta de la mezcla compleja de grupos funcionales que existen en una amplia variedad de ambientes químicos, cada uno caracterizado por constantes de fuerza diferente, lo que provoca un ensanchamiento de las bandas de IR. La espectroscopia infrarroja proporciona información sobre los principales grupos funcionales contenidos en la estructura de los AH y AF (Gostishcheva *et al.*, 2009), así como sobre las posiciones reales de algunos grupos. El método no es destructivo, lo que permite la correspondencia de la preparación de ácido húmico con sustancias nativas presentes para ser evaluado de fácil manejo. Tienen una mayor relación señal-ruido, alta reproducibilidad donde pequeñas cantidades de sustancia son suficientes para su cuantificación.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Extracción de ácidos húmicos y fúlvicos

Se emplearon AH y AF, extraídos de leonardita, cuyas estructuras fundamentales son compuestos del carbono.

Los AH y AF se obtuvieron de la siguiente forma:

Se recolectó la leonardita de una mina ubicada a 29° 30' 22.18" N, 103° 33' 57.13" O, y una altitud de 1096 m, 96.5 km al norte de Presidio, Texas, EE.UU. La leonardita recolectada, fue molida y tamizada en una malla (1.0 mm de diámetro), se tomaron 5 g y se adicionaron 100 mL de hidróxido de potasio (KOH, 1N y pH 13.5. CTR) y se colocó por 2 h en baño maría a 60 °C. Después se tomaron 50 mL de la solución, se aplicó ácido acético (pH 2.4) para promover la reducción a un pH de 4 y observar la separación de las capas de AH en color marrón a negro y AF en color amarillo.

Los ácidos húmicos, ya separados de los ácidos fúlvicos, se lavaron 30 min con agua bidestilada a pH 7 usando una centrifuga y este proceso se repitió 10 veces y se produjeron 2000 mL de AH.

Lo anterior se realizó para eliminar los residuos del ácido acético y contar con un AH lo más puro posible. Los porcentajes de ácidos húmicos y fúlvicos se midieron mediante titulación a retroceso con K_4MnO_7 .

Los AH pertenecen a la fracción de las SH solubles en valores de pH altos, pero su coagulación se presentó a $pH < 2$. La extracción de los AF se dio por la identificación del color amarillo a amarillo marrón remanente en la solución después de haberse extraído los AH debido a su acidificación.

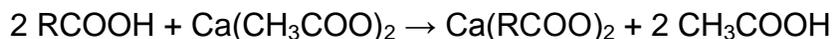
3.2 Solidificación de ácidos húmicos, fúlvicos humatos de calcio y fulvatos de hierro

La solidificación se realizó mediante un rotovaporador (Yamato, Modelo SE 500, Japón), colocando 500 mL de cada ácido en un matraz de 1 L en baño maría a 60 °C, rotado a 80 rpm hasta eliminar el agua, y este proceso de solidificación duró 7 a 8 h. El solvente no fue eliminado por completo por lo que se colocó en una cápsula de porcelana calentado a 40 °C por 2 h en una parrilla eléctrica para eliminar el agua remanente y obtener el sólido restante.

3.3 Cuantificación de grupos funcionales de los ácidos húmicos y fúlvicos

En el proceso de cuantificación de estos ácidos se midió la acidez total (AT), la cual engloba grupos funcionales oxigenados como carboxilos (-COOH) y oxhidrilos (-OH), con base en los procedimientos de Schnitzer y Gupta (1965).

Para medir AT la muestra se trató 24 h con una solución de Ba (OH)₂ 2 N; el Ba(OH)₂ quedó en la solución y después de la reacción se valoró con HCl 1 N. Para valorar los grupos carboxílicos de los materiales húmicos se agitaron 24 h con Ca (CH₃COO)₂, aplicando en exceso para incitar la liberación de ácido acético (CH₃COOH) de acuerdo con la siguiente reacción:



El ácido acético (grupos carboxílicos) se tituló con una solución de NaOH 0.1 N, donde los grupos fenólicos se calcularon por la diferencia de la acidez total con los grupos carboxílicos.

3.4 Espectrómetro Infrarrojo Características y Forma de Uso

Los grupos funcionales se determinaron mediante la generación de espectrogramas utilizando un espectrofotómetro de luz infrarroja (Nicolet IR Series, FTIR Spectrometer, EE.UU.). Después de haberse obtenido la muestra sólida de los compuestos se mezclaron con bromuro de potasio (KBr) en un mortero de ágata hasta obtener un polvo fino. La proporción de la muestra con respecto al KBr fue de 1:100 (muestra/KBr), donde una porción de esta mezcla, por separado se colocó en un portador de muestra para preparar submuestras como pastillas empleando una prensa. La pastilla debe ser homogénea y fina, colocándola en una placa para muestras de acero y de esta forma poderse leer en el IR.

Debe evitarse la contaminación por polvo de la muestra y seguir las indicaciones sobre el uso de la prensa para hacer la pastilla (submuestras). Las submuestras se colocaron en el espectrofotómetro y el análisis se hizo en la banda con 32 escaneos hasta obtener el mejor espectro que debe presentarse en la banda fina e intensa de acuerdo al porcentaje de su transmitancia.

Las variables para obtener el mejor espectro se basan en la relación de muestra-solvente del KBr, valor de ganancia y velocidad de la carta. Una vez obtenido el espectro óptimo para cada muestra se calibra con la escala del espectro en obteniendo el número de ondas de los diferentes componentes.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Schulten and Leinweber. (1991), propuso que los AH consisten en anillos aislados aromáticos vinculados covalentemente por cadenas alifáticas. Schulten y Schnitzer (1997) desarrollaron una molécula de dos dimensiones (2D) la estructura del modelo de AH en la que cuenta con anillos aromáticos alquilo desempeñan un papel importante. El oxígeno está presente en forma de carboxilos, hidroxilos fenólicos y alcohólicas, ésteres y cetonas, mientras que el nitrógeno se produce en nitrilos y estructuras heterocíclicas. El esqueleto de carbono resultante muestra microporosidad alta con huecos de varias dimensiones, que pueden atrapar y se unen otros elementos del suelo orgánicos e inorgánicos, así como el agua. Schulten y Schnitzer (1997) convirtieron la estructura 2D de AH a una en tres dimensiones (3D) mediante el uso de software HyperChem (Figura 1).

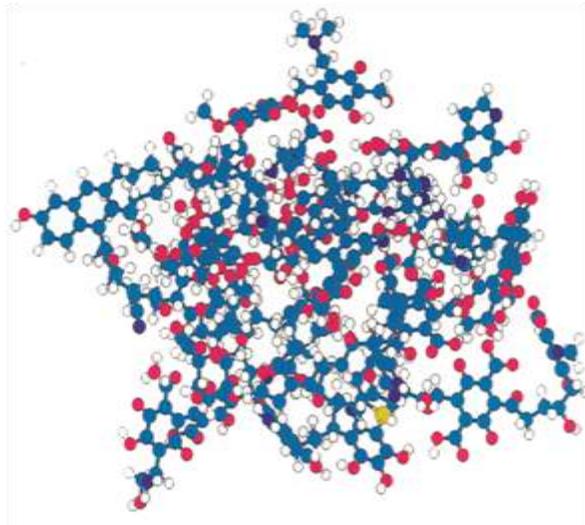


Figura 1. Representación hipotética 3D de ácido húmico propuesto por Schulten y Schnitzer (1997).

En base a los resultados obtenidos de acidez total se pudo desarrollar una estructura hipotética 2D y 3D de ácidos húmicos y fúlvicos extraídos de leonardita mediante el uso del software Chem (Figura 2 y 3).

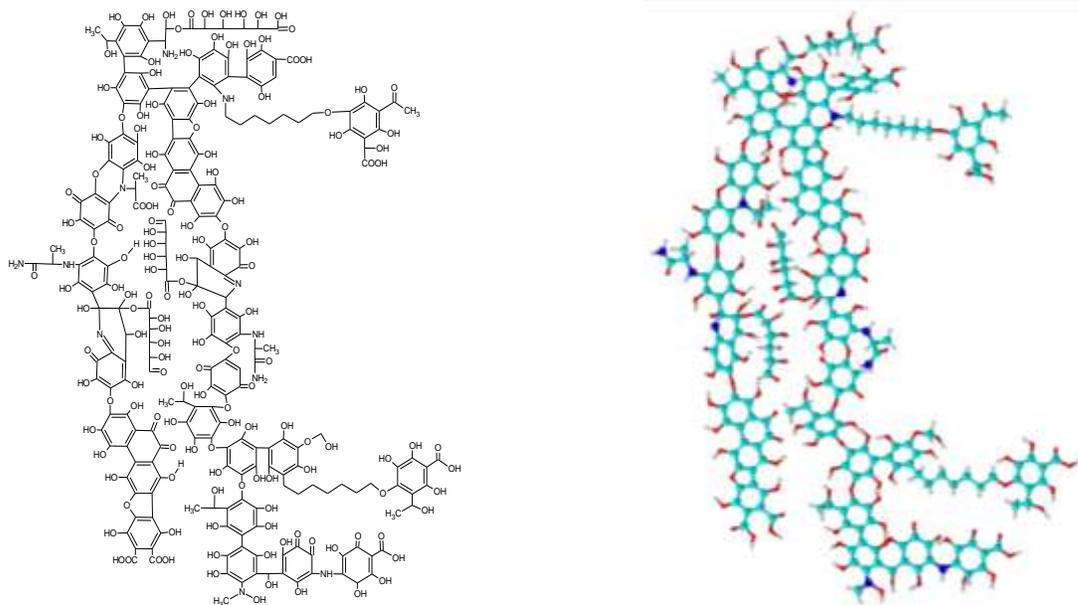


Figura 2. Representación hipotética 2D y 3D de ácidos húmicos extraídos de leonardita.

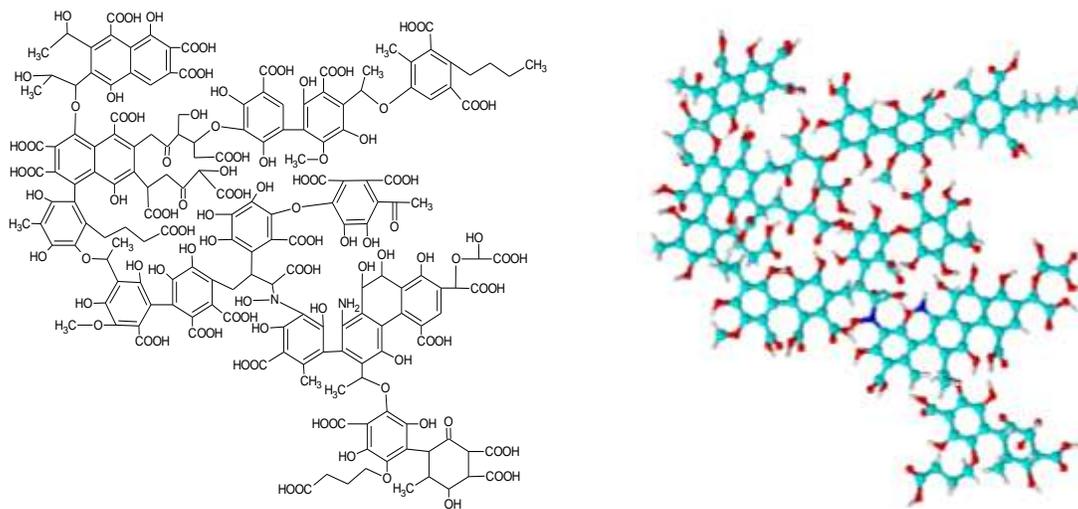


Figura 3. Representación hipotética 2D y 3D de ácidos fúlvicos extraídos de leonardita en el presente experimento.

4.1 Extracción y componentes de ácidos húmicos y fúlvicos

Mediante el método de titulación por retroceso se determinó el porcentaje de los ácidos húmicos que fue de 16 %, y para los fúlvicos 32 %, donde el pH del AH se elevó hasta 8, mientras que el del AF presentó el mismo ajustado para su separación el cual fue de 4.

Con respecto a los componentes de los AH y AF (Cuadro 1), la AT es mayor en el AF con $1275 \text{ cmolc kg}^{-1}$, mientras que para el AH alcanzó $200 \text{ cmolc kg}^{-1}$, lo que representa una ventaja para los AF los cuales se encuentran más polimerizados, donde la adsorción de cationes es mayor.

Cuadro 1. Acidez total (AT) y grupos funcionales de carboxilo (-COOH) y oxhidrilos (-OH), de las sustancias húmicas extraídas de leonardita.

| Substancia | AT | -COOH | -OH |
|------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| Húmica | (cmolc kg^{-1}) | (cmolc kg^{-1}) | (cmolc kg^{-1}) |
| AH | 200 | 10 | 190 |
| AF | 1275 | 560 | 715 |

AH: ácido húmico; AF: ácido fúlvico; AT; acidez total.

En los carboxilos y oxidrilos, los AF fueron superiores a los AH con 560 y 715 cmolc kg^{-1} respectivamente lo que representa una mejor condición para el intercambio iónico.

Evangelou *et al.* (1999), reportaron con respecto a carboxilos y oxidrilos para el AH los valores de 397 y 292 cmolc kg⁻¹ respectivamente mientras que en el presente estudio fueron para carboxilos 10 y para oxidrilos 190 cmolc kg⁻¹.

La diferencia se puede deber a que Evangelou *et al.* (1999) utilizaron hidróxido de sodio como extractante y como fuente de ácidos orgánicos residuos de maíz, mientras que en el presente estudio se usó hidróxido de potasio como extractante y como fuente de ácidos orgánicos la leonardita lo cual como ventaja presenta diferentes niveles de respuesta e intercambio iónico.

4.2 Obtención del Humato de Calcio y Fulvato de Hierro Regulando el pH de la Solución

Siguiendo el criterio establecido por Rady (2012), comentó que un ácido húmico al cual se le puede incorporar un mineral, se le llama en este caso humato de calcio y/o fulvato de hierro, por lo cual en esta investigación se siguió la misma nomenclatura.

El procedimiento de incorporación para este trabajo de estos minerales fue como sigue:

Humato de calcio: a 100 mL del AH el cual contaba con un pH original de 8, se le aplicó 125 g de Ca(NO₃)₂ observándose un decremento en el pH el cual llegó a 7, posteriormente se aplicaron 20 g más para llegar a un total de 145 g de Ca(NO₃)₂ y se observó nuevamente un decremento de pH el cual llegó finalmente a 6.

Fulvato de hierro: a 100 mL de AF el cual contaba con pH original de 4, se le adiciono 0.5 mL de KOH incrementándose el pH de la solución a 8, posteriormente se

añadieron 10 g de FeSO_4 observando un decremento de pH hasta 7, después se añadió 1.75 g más y el pH disminuyó hasta 6.

4.3 Solidificación del Ácido Húmico, Fúlvico, Humatos de Calcio y Fulvatos de Hierro

La solidificación se realizó mediante un rotovaporador (Yamato, Modelo SE 500, Japón), colocando 500 mL al AH (pH original 8), y sus fracciones elaboradas a pH 6 y 7, así mismo para el AF (pH original 4) y sus derivados a pH 6 y 7, dando un total de seis tratamientos, los cuales se depositaron en un matraz de 1 L cada uno, poniéndose bajo condiciones de baño maría a $60\text{ }^\circ\text{C}$, rotando a 80 rpm hasta eliminar el agua, este proceso de solidificación duró 8 h.

El solvente no fue eliminado por completo por lo que se colocó en una cápsula de porcelana calentándola a $40\text{ }^\circ\text{C}$ por 2 h en una parrilla eléctrica para eliminar el agua remanente y de esta forma obtuvo el sólido.

El AH enriquecido con $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ en los niveles de pH 6, 7 y el del pH original de 8, después de su extracción se pueden observar en el espectrograma de la Figura 4. La línea azul representa el AH con pH 8 en la cual se aprecian las señales o grupos funcionales que más participan en los procesos de intercambio iónico: el $-\text{OH}$ del extractante se presenta en la banda de 1375cm^{-1} , N-H aminas o amidas en 1620cm^{-1} , los $-\text{CH}_3$ y $-\text{CH}_2$ presentaron valores para de 2922 cm^{-1} y grupos funcionales libres $-\text{OH}$ en 3400cm^{-1} ; en el AH con pH 7 y 6, líneas roja y verde respectivamente. Después de la incorporación del elemento mineral la aparición de otros picos se pueden apreciar, lo que significa que la descripción de la señal se encuentra en mayor

proporción, facilitando su descripción, diferenciándose los picos por su pureza y concentración. En el grupo funcional en el rango más bajo de la longitud de onda se encontró un grupo aromático-N-R esto representa una amina terciaria en la banda 760 y 631cm^{-1} correspondiendo a los pH 7 y 6, los $-\text{OH}$ secundarios para ambos AH. En los dos pH se localizaron en las bandas 1130 y 1120cm^{-1} , los grupos CH-OH y $-\text{OH}$ del extractante, se encontraron en la misma banda 1390cm^{-1} para las dos mezclas, las aminas o amidas N-H o con enlace carboxilos- C=O con 1620 y 1600cm^{-1} respectivamente, el $-\text{CH}_3$ presentó un valor similar de 1930cm^{-1} , el CH_2-CH_3 se localizó en 2870 y 2840cm^{-1} , de igual manera el $-\text{OH}$ libre se presentó en la misma onda 3390cm^{-1} entre uno y otro compuesto órgano-mineral.

El AH a un pH 6 muestra un mayor contenido de $-\text{OH}$ secundarios seguido de AH a pH 7, sin embargo, en el AH a pH 7 los grupos N-H , C=O y $-\text{OH}$ libre se presentan en mayor cantidad. Esto indica menor absorción de luz o mayor frecuencia individual de este tipo de compuestos en la mezcla mencionada, por lo que la absorción de $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ fue mayor en el AH a pH 7.

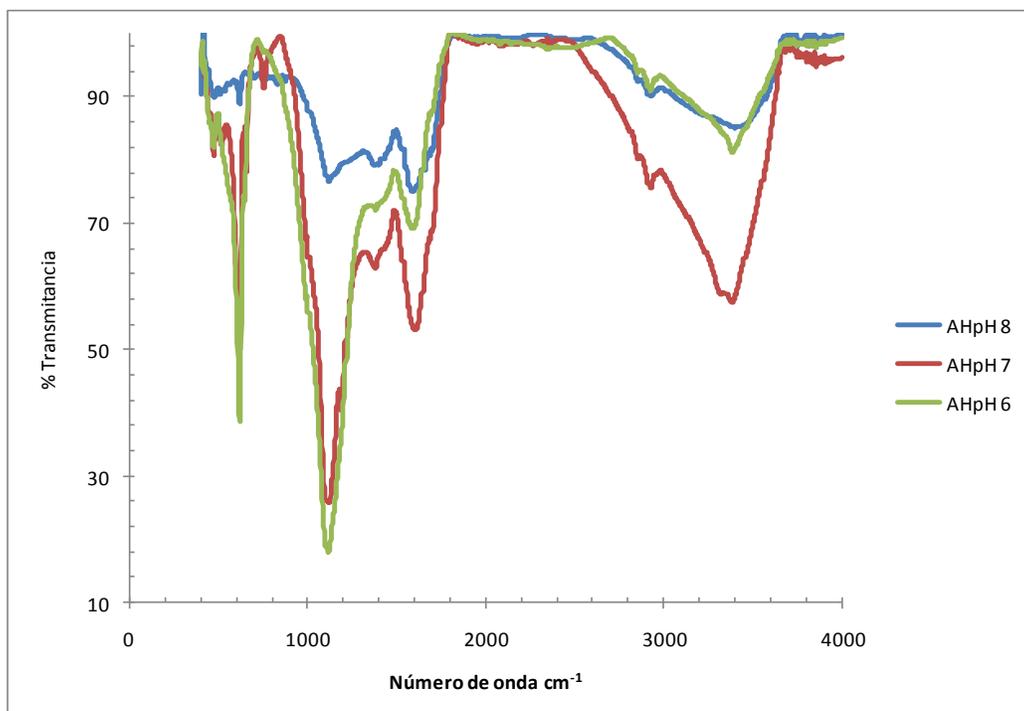


Figura 4. Espectro infrarrojo de ácidos húmicos enriquecidos con nitrato de calcio extraídos de leonardita.

El espectrograma (Figura 5) del ácido fúlvico en su pH original, más los dos niveles que se generaron al mezclarlo con sulfato ferroso (FeSO_4) arrojó los resultados que se describen a continuación:

El AF a pH 4 (línea azul), representa el pH original al momento de la extracción, en este espectro, la lectura denota los siguientes grupos funcionales, con la mejor señal, el metileno- $\text{CH}_2\text{-CH}_3$ presentó el valor de 1162 cm^{-1} , el -OH extractante 1439 cm^{-1} , el grupo de N-H aminas o amidas 1620 cm^{-1} y los -OH libres en 3445 cm^{-1} . El AF con pH 7 y 6, líneas roja y verde respectivamente, posteriormente mezclado con el FeSO_4 formaron diferentes picos, el AF en ambos pH el -OH primario se localiza en 1050 cm^{-1} , y de igual manera el metileno $\text{-CH}_2\text{-CH}_3$ en 1360 cm^{-1} , los grupos $\text{-CH}_2\text{-(C=O)-}$, $\text{-CH}_2\text{-}$

(C≡N) en las bandas 1380 y 1390 cm^{-1} respectivamente, para el -OH extractante 1440 y 1450 cm^{-1} , los grupos de -N-H-aminas o amidas en el 1640 cm^{-1} para ambas mezclas. Un sobretono provocado por un traslape de aminas o amidas-N-H- en la banda de 1810 y 1830 cm^{-1} en los pH 6 y 7, el grupo -CH₃ en los dos pH se limita a la banda 1860 cm^{-1} , de igual manera el -CH₂-CH₃ para los pH se encuentra en 2930 cm^{-1} y el -OH libre en AF a pH 6 en una lectura de 3570 cm^{-1} y AF a pH 7 3430 cm^{-1} .

El AF a pH 6 y 7, estos muestran muchas similitudes, sin embargo, en el AF a pH 7 la frecuencia del grupo funcional libre (-OH) es mayor, por lo que la cantidad de adsorción de hierro también es mayor.

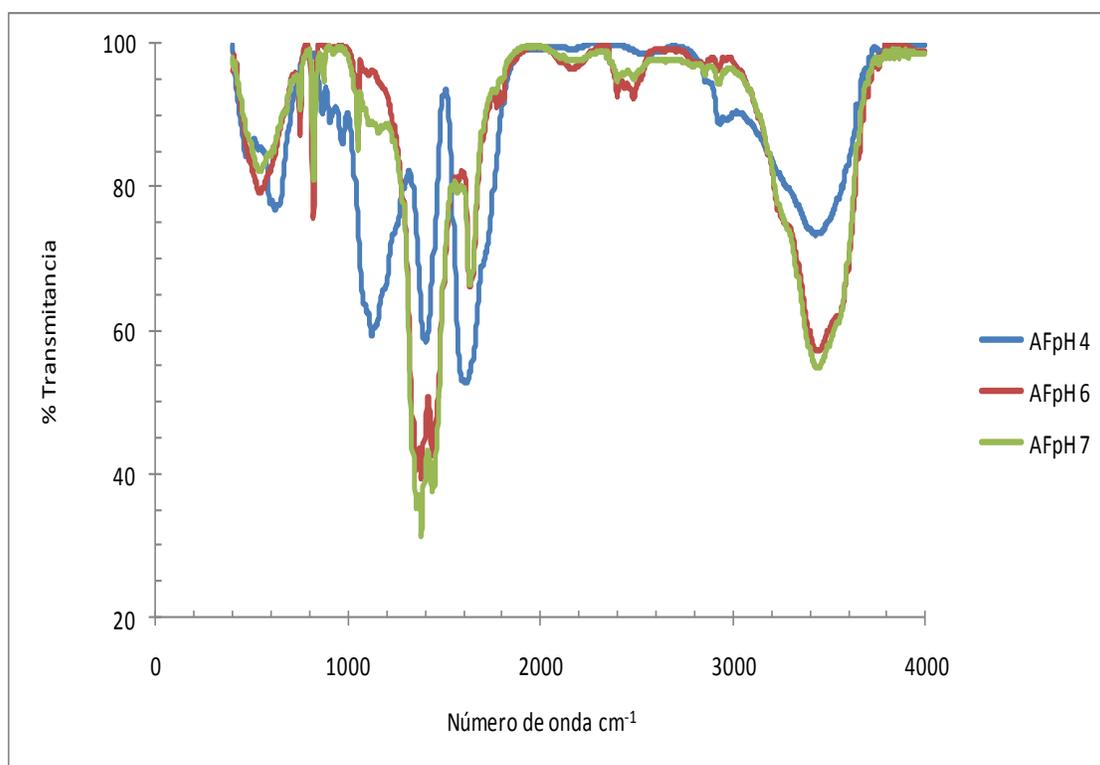


Figura 5. Espectro infrarrojo de ácidos fúlvicos enriquecidos con sulfato ferroso extraídos de leonardita.

Los resultados obtenidos concuerdan con los de Schulten and Leinweber. (1991) propusieron que los AH consisten en anillos aislados aromáticos vinculados covalentemente por cadenas alifáticas. El oxígeno está presente en forma de carboxilos, hidroxilos fenólicos y alcohólicas, ésteres y cetonas, mientras que el nitrógeno se produce en nitrilos y estructuras heterocíclicas.

Por otra parte Schulten y Schnitzer (1997) mencionaron que el esqueleto de los AH muestra microporosidad alta con huecos de varias dimensiones, que pueden atrapar componentes orgánicos del suelo y/o inorgánicos, por ejemplo el agua.

En general se puede observar que la estructura de las SH son la unión de moléculas de bajo peso molecular acopladas por la interacción de enlaces de hidrogeno, grupos carboxilo e hidroxilo, las que están relacionados a la actividad bioquímica de estas sustancias.

Esto coincide con lo expuesto por Sivakova *et al.* (2010) en los espectros de IR, los cuales mostraron una serie de bandas de absorción características de los ácidos húmicos. La presencia de grupos carboxilos y carbonilos ($1720-2700\text{ cm}^{-1}$), grupos hidroxilos ($3400-1256\text{ cm}^{-1}$), éter-oxígeno (1650 cm^{-1}), $-\text{CH}_3-\text{CH}_2$ (2930 cm^{-1}). El extracto alcalino de un fósil que contiene humus, presenta todas las fracciones mencionadas, Naumova (1987) observó que el producto total tuvo y de ahí el hecho del sinergismo de acción de los componentes de los AH.

Así mismo Gotishcheva *et al.* (2009), en un análisis realizado con IR a diferentes turbas encontraron similitud en las bandas con variaciones en las cantidades; la banda intensa y amplia de absorción con un pico en $3500 - 3300\text{ cm}^{-1}$ estaba asociado con las vibraciones de los grupos hidroxilo de diferentes tipos, sobre todo aquellos ligados a los

enlaces de hidrógeno. Esto fue apoyado por el hecho de que el número de onda se redujo a 3400 - 3300 cm^{-1} , como resultado de una reducción en la frecuencia de vibración debido a la formación de enlaces de hidrógeno (la cual representa la intensidad de pico a 3650 - 3585 cm^{-1} lo que es característica de los grupos OH libres). Lo intermedio de absorción fue observado en la cola de onda larga de la banda principal, en torno a 3250 - 3200 cm^{-1} , formando un paso o flexión, debido a las N-H en amidas y aminas unidas a través de enlaces de hidrógeno.

Las bandas de absorción intermedias son claramente visibles a 2926 - 2920 cm^{-1} y 2852 cm^{-1} , debido a las vibraciones de cadenas laterales $-\text{CH}_3$ y $-\text{CH}_2$. Estas bandas no son debidas a los grupos metilo terminales, sino más bien a los grupos metileno, como se indica por la casi perfecta coincidencia de los números de onda con los valores estándar (2926 y 2853 cm^{-1}). El predominio de grupos metileno también están indicados por la naturaleza de las bandas de 1480 - 1380 cm^{-1} , lo que indicaba que los grupos metileno no pueden estar en cualquier tipo de cadenas parafínicas largas. Tales cadenas de $-(\text{CH}_2)_n\text{-R}$, dan fuertes bandas de absorción a 720 cm^{-1} , debido a las vibraciones no valentes de los grupos $-\text{CH}_2$. Las bajas intensidades de las bandas correspondientes a $-\text{CH}_2\text{-CH}_3$ son consistentes con las indicaciones de menor importancia de los alcanos en estructuras de ácidos húmicos y el hecho de que los componentes de los alifáticos (hidrolizables) consisten casi enteramente de aminoácidos y carbohidratos (Sivakova *et al.*, 2010).

Todos los ácidos húmicos muestran débil absorción a 2600 - 2500 cm^{-1} , lo cual es típico de los ácidos carboxílicos. Esta banda ancha es considerada como muy característica por las vibraciones de valencia de los grupos hidroxilo que participan en

la formación de enlaces de hidrógeno fuertes en formas diméricas de ácidos carboxílicos. Un pico de alta intensidad clara, se observa en todos los espectros a 1725 - 1650 cm^{-1} . Esta banda es típica de las vibraciones valentes de grupos carbonilo en cetonas, aldehídos, ácidos carboxílicos, y sus derivados funcionales.

Todas las muestras de ácidos húmicos mostraron una fuerte banda a 1650 - 1600 cm^{-1} , debido a las vibraciones de los planos (grupos carbonilo unidos por enlaces de hidrógeno, iones carboxilato) carbono-carbono y carbono-oxígeno enlaces conjugados en el esqueleto y quinonas aromático. Enlaces aromáticos se consideran que son responsables de esta banda, cuya cima está a 1610 cm^{-1} (Sivakova *et al.*, 2010).

Las vibraciones en 1264 - 1225 cm^{-1} se deben principalmente a las vibraciones de valencia y deformaciones de los enlaces. La absorción en la parte de onda corta del espectro a 1150 - 1000 cm^{-1} es debido a las vibraciones valentes de alcohol y los grupos hidroxilo de hidratos de carbono. En el rango alrededor de 1050 cm^{-1} , la radiación es absorbida por alcoholes primarios; en 1100 cm^{-1} de alcoholes secundarios, y en 1150 cm^{-1} por alcoholes terciarios. La absorción en esta zona también puede ser debido a las vibraciones de valencia de los enlaces glucosídicos de los carbohidratos y los enlaces C-O-C en los éteres cíclicos y alifáticos. Bandas de absorción débiles fueron vistos en números de onda de 1000 a 600 cm^{-1} , posiblemente debido a las vibraciones de deformación extraplanares en anillos aromáticos con dos o más átomos de hidrógeno no sustituidos; de igual manera lo mencionado anteriormente concuerda con Naumova (1987) en sus estudios donde demuestra la presencia de los radicales de importancia de las sustancias húmicas; en las bandas de 3500 - 3300 cm^{-1} es asociado con grupos hidroxilos principalmente los que generan puentes de hidrogeno, en las

bandas de $3650 - 3585 \text{ cm}^{-1}$ es característica de grupos -OH libres, grupos N-H en $3200 - 3250 \text{ cm}^{-1}$ y cadenas $-\text{CH}_3-\text{CH}_2$ en los rangos de $2926 - 2930 \text{ cm}^{-1}$ radicales característicos de los AH que generan absorción de otros materiales.

Estos resultados concuerdan con los obtenidos por Chassapis *et al.* (2010), con respecto al uso de un espectro infrarrojo típico donde se demuestran las interacciones y diferencias existentes en las sustancias húmicas, absorción, adsorción o asociaciones de los diferentes grupos fenólicos de importancia que se encuentran distribuidos en las regiones 1050 , 1650 y 3400 cm^{-1} . También se observa que las propiedades fisicoquímicas de las sustancias húmicas varían según su origen, son biopolímeros multifuncionales amorfos, compuestos por cientos de componentes orgánicos que incluyen carbohidratos y anillos aromáticos condensados, que pueden ser sustituidos por grupos fenólicos, carboxilos, oxhidrilos y metilos, donde estos resultados concuerdan con los obtenidos por Evangelou *et al.* (1999).

Estos grupos tienen la particularidad de complejar y/o quelatar cationes en la solución del suelo, llevarlos a la pared celular de la raíz, similar a agentes quelatantes y/o complejantes y ser transportados los nutrientes por el torrente xilemático hacia los puntos de crecimiento.

El alcance metal-ion (Ca o Fe) se ha demostrado que varía con la concentración de soluto de cationes, el pH, tipo de mineral y enlace (Egozy, 1980). Las Asociaciones supramoleculares húmicas están temporalmente estabilizadas en soluciones acuosas por fuerzas débiles, tales como enlaces de hidrógeno y fuerzas de Van der Waals, dependiendo del pH de la solución y en el carácter hidrófobo de componentes húmicos, respectivamente.

V. CONCLUSIONES

Los ácidos húmicos y fúlvicos extraídos de leonardita mediante la adición de un compuesto alcalino y otro ácido, se simplifican a través de su solidificación, lo cual permite conocer las características estructurales y químicas de dichos ácidos que son pH dependientes de las sustancias que se utilizan para su extracción.

La reactividad de las sustancias húmicas y por tanto, sus efectos sobre el suelo y las plantas están estrechamente relacionados con el tipo y concentración de grupos funcionales de los mismos. Los ácidos fúlvicos contienen un mayor número de grupos funcionales de carácter ácido que los ácidos húmicos, particularmente carboxilos. Además, en los húmicos la mayor parte del oxígeno se encuentra formando parte del núcleo o estructura central, en uniones éter o éster, mientras que para los ácidos fúlvicos está como -COOH u -OH, por lo que los AF presentan mayor AT que los AH, debido a esa mayor presencia de grupos carboxilo e hidroxilo.

Los ácidos húmicos y fúlvicos extraídos de leonardita, son muy similares en su estructura donde el uso la espectroscopia infrarroja proporcionó y permitió caracterizar los grupos funcionales más importantes y tipos de enlaces, así como las posiciones reales de estos y su comparación.

Estos ácidos húmicos y fúlvicos muestran una alta capacidad de adsorción debido a que contienen núcleos de hidratos de carbono aromático con cadenas alifáticas periféricas unidos a ellos, carboxilos, oxhidrilos, fenoles, aminas, amidas y metilos, donde los oxhidrilos presentan la mayor proporción de intercambio con Ca y Fe.

Los radicales libres de oxhidrilos se detectan en los intervalos altos de número de onda, diferenciándose de los oxhidrilos provenientes del diluyente (KOH) porque este produce intervalos bajos de número de onda.

Al ser caracterizadas las sustancias húmicas y las mezclas órgano-minerales en este estudio, mostraron una alta complejidad en las bandas, las cuales se traslapaban haciendo su identificación e interpretación casi idéntica;

La elaboración de los complejos órgano-minerales fue afectado por el manejo del pH, siendo afectada la mezcla final por el tipo de elemento que se incorpora, ya sean estos de una reacción ácida o alcalina.

Independientemente de la reacción original del ácido húmico (pH 8) y fúlvico (pH 4) al modificarse estas a pH 7, se tuvo la absorbancia de luz menor del infrarrojo indicándonos una mayor presencia de Ca y Fe.

El enriquecimiento del material húmico con iones metálicos representa un punto crítico para la aplicación potencial de estas sustancias órgano-minerales en la fertilización moderna, sobre todo si se va a procesar a temperatura ambiente, sin ningún requerimiento de energía.

VI. LITERATURA CITADA

- Ayuso M, Hernandez T, Garcia C, and Pascual JA (1996). Stimulation of barley growth and nutrient absorption by humic substances originating from various organic materials. *Bioresourc. Technol.*, 57: 251–257.
- Bonifacio, E., G. Falsone, and M. Petrillo. 2011. Humus forms, organic matter stocks and carbon fractions in forest soils of northwestern Italy. *Biol. Fertil. Soils* 47:555–566.
- Canellas, L. P., L. R. L. Teixeira-Junior, L. B. Dobbss, C. A. Silva, L. O. Médici, D. B. Zandonadi, and A. R. Façanha. 2008. Humic acids crossinteractions with root and organic acids. *Ann Appl Biol* 153:157–166.
- Chassapis, K., R. Maria, E.Vrettou y A. Parassiris. 2010. Preparation of bioinorganic fertilizing media by adsorption of humates on lassy aluminosilicates. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces* 81 (2010) 115–122.
- Chen, Y. and Aviad, T. 1990. Effects of humic substances on plant growth, in P. MacCarthy, C.E. Clapp, R.L. Malcolm, and P.R. Bloom (eds.), *Humic Substances in Soil and Crop Sciences: Selected Reading*, Soil Sci. Soc. Am., Madison, WI, pp. 161-186.
- Chen, H., R. Berndtsson, M. Ma y K. Zhu. 2009. Characterization of insolubilized humic acid and its sorption behaviors. *Environ Geol* 57:1847–1853.
- Chukov S N (2001) *Structural and Functional Parameters of Soil Organic Matter under the Conditions of Anthropogenic Impact*, St. Petersburg University Publishing House, St Petersburg.

- Egozy, Y. 1980. Adsorption of cadmium and cobalt on montmorillonite as a function of solution composition. *Clays Clay Miner.* 28, 311–317.
- Evangelou, V. P., M. Marsi y M. M. Vandiviere. 1999. Stability of Ca^{2+} -, Cd^{2+} -, Cu^{2+} - [illite-humic] complexes and pH influence. *Plant and Soil* 213: 63–74.
- Flores-Céspedes, F., M. Fernández-Pérez, M. Villafranca-Sánchez, and E. González-Pradas. 2006. Cosorption study of organic pollutants and dissolved organic matter in a soil. *Environ Pollut* 142:449–456.
- Gorovaya A I, D S Orlov and O V Scherbenko (1995) *Humic Substances*, Naukova Dumka, Kiev.
- González, J.L., Benítez, I.C., Pérez, I.M., Medina, M., 1992. Pig slurry compost as wheat fertilizers. *Bioresour. Technol.* 40, 125–130. Tejada, M., Gonzalez, J.L., 2003. Effects of the application of a compost originating from crushed cotton gin residues on wheat yield. *Eur. J. Agron.* 19, 357–368.
- Gostishcheva, M. V., M. V. Belousov, M. S. Yusubov, R. R. Ismatova y S. E. Dmitruk. 2009. Comparative IR spectral characteristics of humic acids from peats of different origin in the Tomsk area. Vol. 43, No. 7, pp. 44-47.
- Hayes, M. H. B., P. MacCarthy, R. L. Malcolm y R. S. Swift. 1989. The search for structure: setting the scene. In *Humic Substances II: In Search of Structure*; EdsWiley New York, pp 3–31.
- Juneta, A., B. D. Isabelle, B. Daniel, M. Armand, L. Samuel, M. Christine, B. Jerome, T. Joelle, D. Sylvie, 2013. Characterisation of organic matter from organo-mineral complexes in an Andosol from Reunion Island. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis.* 99. 92–100.

- A.G.Kalinichev, J.Wang, R.J.Kirkpatrick (2007) Molecular dynamics modeling of the structure, dynamics and energetics of mineral-water interfaces: application to cement materials. *Cement and Concrete Research*, 37, 337-347.
- Kononova, M. M. 1966. *Soil Organic Matter*, Pergamon, Oxford.
- Moros, J., P. Herbello-Hermelo, A. Moreda-Piñeiro, P. Bermejo-Barrera, S. Garrigues y M. de la Guardia. 2008. Screening of humic and fulvic acids in estuarine sediments by near-infrared spectrometry. *Anal. Bioanal. Chem.* 392:541–549.
- Naumova, A. M. (1987): *Protozoi i zabolevanija ryb v vodoemah kolhozov i sovhozov. — Sovremenyje problemy protozoologii.* Nauka, Leningrad.
- Rady, M. M. 2012. A novel organo-mineral fertilizer can mitigate salinity stress effects for tomato production on reclaimed saline soil. *South African Journal of Botany* 81, 8–14.
- Rauthan B S and M Schnitzer (1981) Effects of soil fulvic acid on the growth and nutrient content of cucumber (*Cucumis sativus*) plants, *Plant and Soil* 63, 491-495.
- Ryabova, I. N. 2010. Organomineral Sorbent from Shubarkol Coal. ISSN 0361-5219, *Solid Fuel Chemistry*, Vol. 44, No. 5, pp. 335–338.
- Pizzeghello, D., Nicolini, G. and Nardi, S. 2001. Hormone-like activity of humic substances in *Fagus sylvaticae* forests. *New Phytol* 151:647–657.
- Peuravuori, J., P. Zbankova y K. Pihlaja. 2006. Aspects of structural features in lignite and lignite humic acids, *Fuel Process Technol.* 87, 829–839.
- Schulten, H. R, and P. Leinweber. 1991. Influence of long-term fertilization with farmyard manure on soil organic matter: Characteristics of particle-size fractions. *Biol. Fertil. Soils* 12: 81-88.

- Schulten, H. R, and M. Schnitzer. 1997. The chemistry of soil organic nitrogen: a review. *Biol. Fertil. Soils* 26, 1–15.
- Schnitzer, M, and U. C. Gupta. 1965. Determination of acidity in soil organic matter. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 29, 274–277.
- Schnitzer M. y Khan, S.U. (1978). *Soil organic matter*. Eviswer Sc. Public. Co 319cc
- Schnitzer, M. 2000. Life Time Perspective on the Chemistry of Soil Organic Matter. D. L. Sparks (Ed.). *Advances in Agronomy*, Academic Press. 98: 3-58.
- Sivakova, L. G., N. P. Lesnikova, N. M. Kim, and G. M. Rotova. 2010. Physicochemical Properties of the Humic Substances of Peat and Brown Coal. *Solid Fuel Chemistry*, 2011, Vol. 45, No. 1, pp. 1–6. © Allerton Press, Inc., 2011.
- Sutton, R. y G. Sposito. 2005. Molecular Structure in Soil Humic Substances: The New View. *Environmental Science and Technology*. Vol. 39. No. 23, pp. 9009-9015.
- Ulanov N N (1993) Possibilities of use of oxidized coal and humic substances in agriculture, in D.S. Orlov (eds.), *Humic Substances in Biosphere*, Nauka, Moscow, pp. 157-162.
- Yang ST, Sheng GD, Tan XL, Hu J, Du JZ, Montavon G, Wang XK (2011a) Determination of Ni(II) uptake mechanisms on mordenite surfaces: a combined macroscopic and microscopic approach. *Geochim Cosmochim Acta* 75:6520–6534
- Yuan, Z., L. Sun, Y. Lu, and J. Wang. 2006. Study on the content of humic acid extracting from grass peat [J]. *Municipal Engineering Technology*, 26(2): 154–156. (in Chinese).

Zou, J., F. Wang, H. Zhu, and Y. Zhi. 2006. Study of the extraction of humic acid from weathered coal [J]. Chemical Industry Times, 20(6):10–12. (in Chinese)

METODOLOGIA PARA OBTENER ACIDOS HUMICOS Y FULVICOS Y SU CARACTERIZACIÓN MEDIANTE ESPECTOFOTOMETRIA INFRARROJA

Methodology For Obtaining Humic And Fulvic Acids And Its Characterization By Infrared Spectrophotometry

**Rubén López-Salazar¹, Rigoberto Eustacio Vázquez-Alvarado ^{2*}, Guillermo González-Cervantes³,
Emilio Olivares-Sáenz⁴, Juan Antonio Vidales-Contreras⁴, Roberto Carranza del la Rosa⁴, Manuel
Ortega-Escobar⁵**

¹Ciencias Agrícolas. Subdirección de Estudios de Posgrado. Facultad de Agronomía. U.A.N.L. e-mail:
rlsmorris@hotmail.com

^{2*} Autor de correspondencia. Facultad de Agronomía. U.A.N.L. Marín, Nuevo León, México. e-mail:
r_vazquez_alvarado@yahoo.com.mx

³ Centro Nacional De Investigación Disciplinaria En Relación Agua, Suelo, Planta, Atmosfera. Km. 6.5
margen derecha Canal de Sacramento, Gómez Palacio c.p. 35140, Gómez Palacio Durango

⁴Facultad de Agronomía. U.A.N.L. Marín, Nuevo León, México.

⁵Colegio de Posgraduados. Carretera México-Texcoco Km. 36.5, Montecillo. 56230, Estado de México.

RESUMEN

Los extractos orgánicos en la actualidad tienen gran aceptación por los productores agrícolas fundamentalmente por su costo y al éxito de sus aplicaciones en los cultivos, con el fin de obtener un compuesto orgánico-mineral o humato como alternativa para eficientar los nutrientes a los cultivos, se recolectó un mineral fósil orgánico de una mina, en laboratorio se extrajeron las fracciones de ácido húmico (AH) y fúlvico (AF). Después se ajustó el pH de estos ácidos con fertilizantes químicos. Para los ácidos húmicos y fúlvicos se maneja un pH de 6, 7, 8 y 4, 6, 7 respectivamente y finalmente se solidificaron. Para la caracterización de los grupos funcionales de estos ácidos se utilizó un espectrómetro de luz infrarroja (IR). Los resultados muestran que ácidos húmicos y fúlvicos presentan grupos

funcionales similares pero en cantidad diferente, la mezcla orgánico-mineral de AH y AF mostraron un comportamiento similar en adsorción del elemento incorporado, sin embargo el AH y AF ambos con pH 7 presentaron la mayor adsorción del Ca y Fe, esto se debe a que son compuestos pH dependientes y la capacidad de agrupamiento se debe a la reacción de intercambio catiónico dada por los radicales libres.

Palabras clave: orgánico-mineral, extractos orgánicos, grupos funcionales.

SUMMARY

Organic extract currently have wide acceptance by farmers mainly because of cost and success of its applications in crops, in order to obtain an organic-mineral or humate as an alternative for efficient crop nutrients, a organic fossil mineral was collected of a mine, laboratory extracted the fractions of humic acid (HA) and fulvic (FA). After the pH was adjusted from these acids with chemical fertilizers. For humic and fulvic acids are handling a pH of 6, 7, 8 and 4, 6, 7 respectively and finally solidified. Infrared spectrometer (IR) was used for the characterization of the functional groups of these acids. The results showed that humic and fulvic acids have similar functional groups but different amount, the organic-mineral mixture of HA and FA showed similar behavior in embedded component adsorption, however the HA and FA both at pH 7 showed the highest adsorption Ca and Fe, this is because the compounds are pH dependent and grouping formation is due to the cation exchange reaction given by free radicals.

Keywords: organic-mineral, organic extract, functional groups.

INTRODUCCIÓN

Los ecosistemas terrestres representan el carbono más interactivo (C). Hasta 67% de las 1500 Gt de C orgánico del suelo están presentes entre 20 y 100 cm de profundidad, el C orgánico del suelo recibe el nombre de materia orgánica (MO), se compone de una mezcla heterogénea de compuestos orgánicos de diversos orígenes. En el subsuelo la MO se asocia principalmente con fases minerales y ambos forman agrupaciones orgánico-minerales, la formación de estos agrupamientos protege la MO de la degradación, sin embargo, los suelos no están hechos solo de minerales o sustancias orgánicas, estos dos componentes interactúan entre si y por lo tanto controlan la química de la superficie del suelo; estas interacciones son

importantes, pero en especial los suelos que reciben o acumulan grandes cantidades de sustancias orgánicas (Juneta *et al.*, 2013).

Las sustancias húmicas (SH) se componen de ácidos húmicos (AH), ácidos fúlvicos (AF) y huminas residuales (HR), definidas como macromoléculas orgánicas, con una estructura química compleja, distinta y estable que provienen de la degradación de plantas y animales, por la actividad enzimática de microorganismos y metamorfismo orgánico (Schnitzer, 2000 y Sutton y Sposito, 2005), 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 que engloba a un grupo de sustancias (Berthelin *et al.*, 2006), son la fracción orgánica del suelo más importante por su actividad en procesos físicos, químicos y biológicos en el suelo (Maccarthy, 2001), los AH son solubles en medios alcalinos, aunque no las condiciones de ácidos fuertes, si el $\text{pH} < 2$. Los AF solubles en condiciones alcalinas y ácidas a diferencia de las huminas que son insolubles. La clasificación de las tres fracciones no representa tres tipos distintos de moléculas orgánicas (Hayes *et al.*, 1989), esto es debido al hecho de que las sustancias húmicas contienen diversos tipos de grupos funcionales cuyas capacidades de agrupamiento de metal varían considerablemente, pues suelen incluir un esqueleto de moléculas aromáticas alquilo con grupos funcionales, como ácidos carboxílicos, hidroxilo fenólico y grupos quinona unidos a ellos (Flores-Céspedes *et al.*, 2006; Chen *et al.*, 2009). La evidencia sugiere que la agrupación del metal con inorgánicos y/o ligandos orgánicos en el suelo puede tener una influencia en la movilidad y la biodisponibilidad de los metales para los organismos del suelo y plantas.

Una alternativa para eficientar los nutrimentos a los cultivos consiste en la combinación con compuestos inorgánicos, la aplicación de AH como una enmienda orgánica del suelo en combinación con otros materiales, resulta en un aumento significativo en el crecimiento de la planta y rendimiento de los cultivos, mediante la mejora de las propiedades hidrofísicas y disponibilidad de nutrimentos de los suelos. Los complejos orgánico-minerales permiten a las plantas superar los efectos adversos de la salinidad del suelo, mejora la agregación, aireación, permeabilidad, capacidad de retención de agua, absorción de

micronutrientes y disponibilidad y la disminución de la absorción de algunos elementos tóxicos (Ryabova, 2010).

Los métodos de espectroscopia cuantifican la composición química que forman las capas de los AH y AF, el método más acertado es el de infrarrojo cercano (Moros *et al.*, 2008). La espectroscopia infrarroja (IR) es de precisión y desarrollado en la actualidad para caracterizar las SH y sus fracciones: AH y AF. Los espectros IR de SH se caracterizan por su simplicidad, en la comparación con los espectros de la estructura definida de compuestos puros. Esta sencillez resulta de la mezcla compleja de grupos funcionales que existen en una amplia variedad de ambientes químicos, cada uno caracterizado por constantes de fuerza diferente, lo que provoca un ensanchamiento de las bandas de IR (MacCarthy y Rice, 1985). La espectroscopia infrarroja proporciona información sobre los grupos funcionales contenidos en la estructura de los AH y AF (Gostishcheva *et al.*, 2009). El objetivo de este estudio es obtener y caracterizar un compuesto orgánico-mineral, húmico y fúlvico y caracterizar sus grupos funcionales mediante espectrofotometría infrarroja.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se utilizó un compuesto orgánico mineral de nombre leonardita obtenida de una mina ubicada a 29° 30' 22.18'' N, 103° 33' 57.13'' O, a una altitud de 1096 m, 96.5 km al norte de Presidio, Texas, EE.UU.

La leonardita recolectada se transportó al laboratorio donde fue molida y tamizada con una malla (1.0 mm diámetro), se pesaron 5 g de Leonardita, se colocó en un matraz de 250 ml y se le adicionaron 100 ml de hidróxido de potasio (KOH y pH 13.5), 1N. Se coloca en "Baño María" a 60 °C durante dos horas y se deja enfriar. Se toman 25 ml de la solución, se pesan y se le determina la Densidad. Después, con ácido acético (pH 2.4), se le lleva el pH a 4; aquí, el potenciómetro deberá calibrarse con las soluciones Buffer de 4, 7 y 10, se calienta a 70 °C y se centrifuga a 8000 rpm durante 30 minutos. Los ácidos húmicos precipitan; mientras que los ácidos fúlvicos permanecen en solución. La extracción de los AF se dio por la identificación del color amarillo a amarillo marrón remanente en la solución después de haberse extraído los AH debido a su acidificación.

Espectrómetro Infrarrojo Características y Forma de Uso

Los grupos funcionales se determinaron mediante la generación de espectrogramas utilizando un espectrofotómetro de luz infrarroja (Nicolet IR Series, FTIR Spectrometer, EE.UU.). Después de haberse obtenido la muestra sólida de los compuestos se mezclaron con bromuro de potasio (KBr) en un mortero de ágata hasta obtener un polvo fino. La proporción de la muestra con respecto al KBr fue 1:100 (muestra/KBr) y una porción de estos compuestos por separado se colocó en un portador de muestra para preparar submuestras en pastillas empleando una prensa, la pastilla debe ser homogénea y fina, colocándola en una placa para muestras de acero para leerse en el IR. Debe evitarse la contaminación por polvo de la muestra y seguir las indicaciones sobre el uso de la prensa para hacer la pastilla (submuestras). Las submuestras se colocaron en el espectrofotómetro y el análisis se hizo en la misma banda con 32 escaneos hasta obtener el mejor espectro que debe presentarse en la banda fina e intensa de acuerdo al porcentaje de su transmitancia. Las variables para obtener el mejor espectro se basan en la relación de muestra-solvente (KBr), valor de ganancia y la velocidad de la carta. Una vez obtenido el espectro óptimo para cada muestra se calibró la escala del espectro en el papel, obteniendo el número de ondas de los diferentes componentes.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Medición de Porcentaje y Grupos Funcionales para Ácidos Húmicos y Ácidos Fúlvicos

Se tomaron 50 ml de la solución y con ácido acético, mediante la reducción del pH hasta cuatro, se separaron los ácidos húmicos de los fúlvicos. Con la metodología de laboratorio de titulación a retroceso con permanganato de potasio (K_4MnO_7), se midieron los porcentajes de ácidos húmicos y ácidos fúlvicos (Cuadro 1).

Cuadro 1. Porcentaje de ácidos húmicos y fúlvicos.

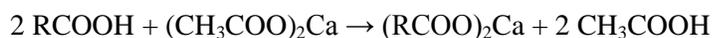
| % AH | % AF |
|------|------|
| 16 | 32 |

Les fueron medidos el contenido de acidez total (AT); es decir, el contenido de grupos funcionales oxigenados como los carboxilos (-COOH) y oxhidrilos (-OH), los procedimientos descritos aquí se basan

en la medición de la acidez total y la acidez carboxílica de Wright y Schnitzer (1959), y Schnitzer y Gupta (1965).

Para la medición de la acidez total, la muestra se trata con una solución de hidróxido de bario en 2 N durante 24 h. El Ba(OH)₂ queda en la solución después de la reacción se valora con una solución de ácido estándar.

Para la valoración de los grupos carboxílicos, los materiales húmicos se agitan durante 24 h con una solución de acetato de calcio en exceso lo que provoca la liberación de ácido acético de acuerdo a una reacción del tipo:



El ácido acético se libera a continuación, se titula con una solución de bicarbonato estándar.

La proporción de los grupos fenólicos se calculo por la diferencia entre la acidez total y la acidez de los grupos carboxílicos.

De forma general, se puede establecer que los ácidos fúlvicos están más oxidados que los ácidos húmicos, por lo cual esto quiere decir que los primeros están más polimerizados que los segundos. De forma particular, se puede comentar que los ácidos fúlvicos, son los más oxidados, porque son los que presentan el superior valor de acidez total.

Lo anterior, pone de manifiesto que los ácidos fúlvicos, contienen mayor número de cargas eléctricas negativas.

Cuadro 2. Acidez total (AT) y grupos funcionales carboxilo (-COOH) y oxhidrilos (-OH), de sustancias húmicas extraídas de leonardita.

| Tipo de sustancia | AT | -COOH | -OH |
|-------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| húmica | (cmolc.kg ⁻¹) | (cmolc.kg ⁻¹) | (cmolc.kg ⁻¹) |
| AH | 200 | 10 | 190 |
| AF | 1275 | 560 | 715 |

AH. Acido húmico; AF. Acido fúlvico.

Canellas *et al.* (2008), definen las SH como asociaciones supramoleculares relativamente pequeñas, agrupadas básicamente por interacciones hidrofóbicas y puentes de hidrógeno. Schulten y Schnitzer (1993) desarrollaron una molécula de dos dimensiones (2D) la estructura del modelo de AH en la que cuenta con anillos aromáticos alquilo desempeñan un papel importante. El oxígeno está presente en forma de carboxilos, hidroxilos fenólicos y alcohólicas, ésteres y cetonas, mientras que el nitrógeno se produce en nitrilos y estructuras heterocíclicas. El esqueleto de carbono resultante muestra microporosidad alta con huecos de varias dimensiones, que pueden atrapar y se unen otros elementos del suelo orgánicos e inorgánicos, así como el agua.

Obtención del humato de calcio y fulvato de hierro regulando las condiciones de pH de la solución

Siguiendo el criterio establecido por Iakimenko, 2005 y Rady, 2012, los que comentaron de acuerdo a sus investigaciones que un ácido húmico al cual se le puede incorporar un mineral, se le llama en este caso humato de calcio y/o fulvato de hierro, donde la incorporación que se siguió en esta investigación de estos minerales fue como sigue:

Humato de calcio: a 100 mL del AH el cual contaba con un pH original de 8, se le aplicó 125 g de $(\text{CaNO}_3)_2$ observándose un decremento en el pH el cual llego a 7, posteriormente se aplicaron 20 g más para llegar a un total de 145 g de $(\text{CaNO}_3)_2$ y se observó nuevamente un decremento de pH el cual llego finalmente a 6.

Fulvato de hierro: a 100 mL de AF el cual contaba con pH original de 4, se le adiciono 0.5 mL de KOH incrementándose el pH de la solución a 8, posteriormente se añadieron 10 g de FeSO_4 observando un decremento de pH hasta 7, después se añadió 1.75 g más y el pH disminuyo hasta 6.

Solidificación del ácido húmico, fúlvico, humatos de calcio y fulvatos de hierro

La solidificación se realizó mediante un rotovaporador (Yamato, Modelo SE 500, Japón), colocando 500 mL al ácido húmico (pH original 8), y sus fracciones elaboradas a pH 6 y 7, así mismo para el ácido fúlvico (pH original 4) y sus derivados a pH 6 y 7, dando un total de seis tratamientos, los cuales se depositaron en un matraz de 1 L, poniéndose bajo condiciones de baño maría a 60 °C, rotando a 80 rpm hasta eliminar el agua, este proceso de solidificación duró 8 h. El solvente no fue eliminado por completo por lo que se colocó en una cápsula de porcelana calentándola a 40 °C por 2 h en una parrilla eléctrica para eliminar el agua remanente y de esta forma obtener el sólido.

El ácido húmico enriquecido con nitrato de calcio ($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$) en los niveles de pH 6, 7 y el pH original de 8 después de su extracción se pueden observar en el espectrograma de la Figura 1.

La línea azul representa el AH con pH 8 en la cual se aprecian las señales o grupos funcionales que más participan en los procesos de intercambio iónico: el $-\text{OH}$ del extractante o vehículo para extraer se presenta en la banda de 1375cm^{-1} , N-H aminas o amidas en 1620cm^{-1} , los $-\text{CH}_3$ y $-\text{CH}_2$ presentaron valores para de 2922cm^{-1} y grupos funcionales libres $-\text{OH}$ en 3400cm^{-1} ; en el AH con pH 7 y 6, líneas roja y verde respectivamente, después de la incorporación del elemento mineral la aparición de otros picos se pueden apreciar, lo que significa que la descripción de la señal se encuentra en mayor proporción, facilitando su descripción, diferenciándose los picos por su pureza y concentración; el grupo funcional en el rango más bajo de la longitud de onda se encontró un grupo aromático-N-R esto representa una amina terciaria en la banda 760 y 631cm^{-1} correspondiendo a los pH 7 y 6, los $-\text{OH}$ secundarios para ambos AH en los dos pH se localizaron en las bandas 1130 y 1120cm^{-1} , los grupos CH-OH , $-\text{OH}$ del vehículo de extracción, se encontraron en la misma banda 1390cm^{-1} para las dos mezclas, las aminas o amidas N-H o con enlace carboxilos- $\text{C}=\text{O}$ en 1620 y 1600cm^{-1} , respectivamente, el $-\text{CH}_3$ presento un valor similar de 1930cm^{-1} , el CH_2-CH_3 se localizó en 2870 y 2840cm^{-1} , de igual manera el $-\text{OH}$ libre se presentó en la misma onda 3390cm^{-1} entre uno y otro compuesto orgánico-mineral. El AH a un pH 6 muestra un mayor contenido de $-\text{OH}$ secundarios seguido de AH a pH 7, sin embargo, en el AH a pH 7 los grupos N-H, $\text{C}=\text{O}$ y $-\text{OH}$ libre se presentan en mayor cantidad, esto indica menor absorción de

la luz o mayor frecuencia individual de este tipo de compuestos en la mezcla mencionada, por lo que la absorción de $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ fue mayor en el AH a pH 7.

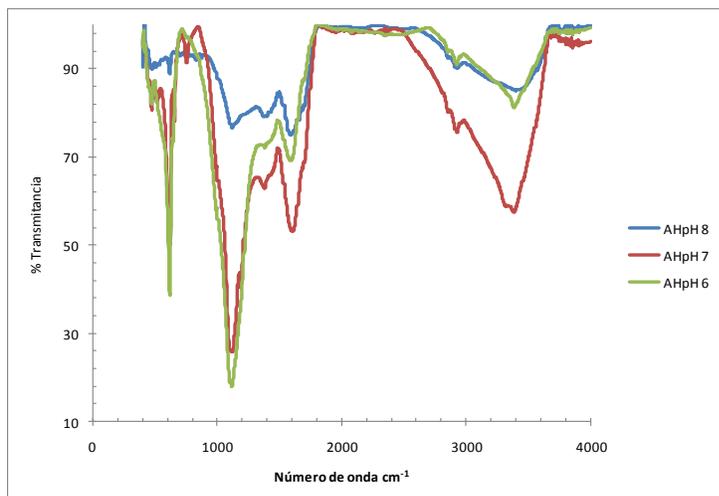


Figura 1. Espectro infrarrojo de ácidos húmicos enriquecidos con nitrato de calcio extraídos de leonardita.

El espectrograma (Figura 2) del ácido fúlvico en su pH original, más los dos niveles que se generaron al mezclarlo con sulfato ferroso (FeSO_4) arrojó los siguientes resultados.

El AF a pH 4 (línea azul), representa el pH original al momento de la extracción, en este espectro, la lectura denota los siguientes grupos funcionales, con la mejor señal, el metileno- $\text{CH}_2\text{-CH}_3$ presento el valor de 1162 cm^{-1} , para el -OH cuya función es ser el vehículo de extracción 1439 cm^{-1} , el grupo de N-H aminas o amidas 1620 cm^{-1} y los -OH libres en 3445 cm^{-1} ; el AF con pH 7 y 6, líneas roja y verde respectivamente, posteriormente mezclado el FeSO_4 diferentes picos se formaron, el AF en ambos pH el -OH primario se localiza en 1050 cm^{-1} , de igual manera el $\text{-CH}_2\text{-CH}_3$ en 1360 cm^{-1} , los grupos $\text{-CH}_2\text{-}(\text{C}=\text{O})\text{-}$, $\text{-CH}_2\text{-}(\text{C}\equiv\text{N})$ en las bandas 1380 y 1390 cm^{-1} respectivamente, para el -OH de extracción 1440 y 1450 cm^{-1} , los grupos de -N-H-aminas o amidas en el 1640 cm^{-1} para ambas mezclas, un sobretono

provocado por un traslape de aminas o amidas-N-H- en la banda de 1810 y 1830 cm^{-1} en los pH 6 y 7, el grupo $-\text{CH}_3$ en los dos pH se limita a la banda 1860 cm^{-1} , de igual manera el $-\text{CH}_2-\text{CH}_3$ para los pH se encuentra en 2930 cm^{-1} y el $-\text{OH}$ libre en AF a pH 6 en una lectura de 3570 cm^{-1} y AF a pH 7 3430 cm^{-1} . El AF a pH 6 y 7 muestran muchas similitudes, sin embargo, en el AF a pH 7 la frecuencia del grupo funcional libre ($-\text{OH}$) es mayor, por lo que la cantidad de adsorción de hierro también es mayor.

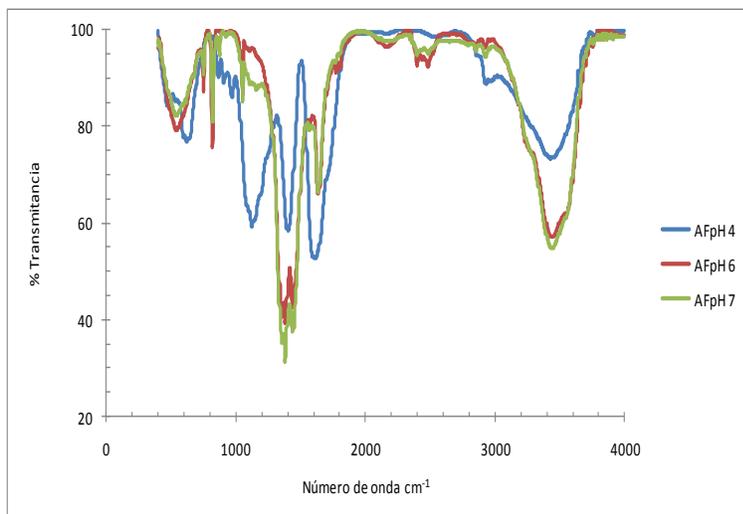


Figura 2. Espectro infrarrojo de ácidos fúlvicos enriquecidos con sulfato ferroso extraídos de leonardita.

Estos resultados concuerdan con los obtenidos por Chassapis *et al.* (2010), con respecto al uso de un espectro infrarrojo típico donde se demuestran las interacciones y diferencias existentes en las sustancias húmicas, absorción, adsorción o asociaciones de los diferentes grupos fenólicos de importancia que se encuentran distribuidos en las regiones 1050, 1650 y 3400 cm^{-1} , esto coincide con lo expuesto por Sivakova *et al.* (2010) en los espectros de IR mostraron una serie de bandas de absorción características de los ácidos húmicos. La presencia de grupos carboxilos y carbonilos (1720-2700 cm^{-1}), grupos hidroxilos (3400-1256 cm^{-1}), éter-oxígeno (1650 cm^{-1}), $-\text{CH}_3-\text{CH}_2$ (2930 cm^{-1}). También se observa que las propiedades fisicoquímicas de las sustancias húmicas varían según su origen (Fukushima *et al.*, 2006), son biopolímeros multifuncionales amorfos, compuestos por cientos de componentes orgánicos que

incluyen carbohidratos y anillos aromáticos condensados, que pueden ser sustituidos por grupos fenólicos, carboxilos, oxhidrilos y metilos, donde estos resultados concuerdan con los obtenidos por Peuravuori *et al.* (2006) y Evangelou *et al.* (1999). Estos grupos tienen la particularidad de agrupar y/o quelatar cationes en la solución del suelo, llevarlos a la pared celular de la raíz, similar a agentes quelatantes y ser transportados los nutrientes por el torrente xilemático hacia los puntos de crecimiento. El enlace metal-ion (Ca o Fe) se ha demostrado que varía con la concentración de soluto de cationes, el pH, tipo de mineral y enlace (Puls and Bohn, 1988), los complejos orgánico-minerales permiten a las plantas superar los efectos adversos de la salinidad del suelo, mejora la agregación, aireación, permeabilidad, capacidad de retención de agua, absorción de micronutrientes y disponibilidad, y la disminución de la absorción de algunos elementos tóxicos (Ryabova, 2010). Los resultados obtenidos por muchos autores sugieren que la cantidad y la fuerza de agrupamiento de iones no parecen estar relacionados con el peso atómico, número atómico, radio iónico, o el radio hidratado del metal retenido, esto es debido al hecho de que las sustancias húmicas contienen diversos tipos de grupos funcionales cuyas capacidades de agrupamiento de iones varían considerablemente.

Una forma prometedora para mejorar la calidad de las sustancias húmicas consiste en su combinación con productos inorgánicos, esto hace que sea posible conferir resistencia mecánica y resistencia a la hidrólisis ácida y alcalina para los compuestos húmicos y mejorar sus propiedades de sorción. Es un procedimiento accesible y barato para ser utilizado en el desarrollo de adsorbentes orgánico-minerales porque dichas materias primas son abundantes, baratos, y capaz de ser modificado químicamente.

CONCLUSIONES

El uso de la espectrofotometría infrarroja permitió caracterizar los grupos funcionales de las sustancias húmicas y su comparación.

La concentración total del elemento químico y el pH de la sustancia húmica, son los dos factores más determinantes en la interacción compuesto húmico-elemento químico. Los ácidos húmicos y los ácidos fúlvicos, son más oxidados y por lo tanto, poseen mayor capacidad de agrupar cationes.

Los ácidos fúlvicos pueden ser considerados como asociaciones de pequeñas moléculas hidrofílicas en los que hay grupos funcionales ácidos suficiente para mantener los grupos fúlvicos dispersos en la solución a cualquier pH. Los ácidos húmicos son hechos por las asociaciones de compuestos predominantemente hidrofóbica (cadenas polimetilénica, ácidos grasos, compuestos esteroides), que se estabilizan a un pH neutro por fuerzas hidrofóbicas de dispersión. Sus conformaciones crecen progresivamente cuando sus vínculos intermoleculares de hidrógeno son cada vez más formada en valores de pH más bajos, hasta flocular. Spaccini *et al.* (2008) propone que, basándose en el concepto de asociación supramolecular, las definiciones clásicas de los ácidos húmicos y fúlvicos debe ser reconsiderada.

Los ácidos húmicos y fúlvicos extraídos de leonardita muestran una alta capacidad de adsorción debido a carboxilos, oxhidrilos, fenoles, aminas, amidas y metilos, donde los oxhidrilos presentan la mayor proporción de intercambio con Ca y Fe.

Los radicales libres de oxhidrilos se detectan en los intervalos altos de número de onda, diferenciándose de los oxhidrilos provenientes del vehículo de extracción (KOH) porque este produce intervalos bajos de número de onda.

La elaboración de las agrupaciones orgánico-minerales fueron afectadas por el manejo del pH, siendo afectada la mezcla final por el tipo de elemento que se incorpora, ya sean estos de una reacción ácida o alcalina.

Independientemente de la reacción original del ácido húmico (pH 8) y fúlvico (pH 4) al modificarse estas a pH 7, se tuvo la absorbancia de luz menor del infrarrojo indicándonos una mayor presencia de Ca y Fe.

LITERATURA CITADA

- Berthelin, J., U. Babel, and F. Toutain. 2006. History of soil biology. In: Warkentin, B. P. (Ed.), *Footprints in the Soil. People and Ideas in Soil History*. Elsevier, Amsterdam. pp: 279–306.
- Canellas, L. P., L. R. L. Teixeira-Junior, L. B. Dobbss, C. A. Silva, L. O. Médiçi, D. B. Zandonadi, and A. R. Façanha. 2008. Humic acids crossinteractions with root and organic acids. *Ann Appl Biol* 153:157–166.
- Chassapis, K., R. Maria, E. Vrettou y A. Parassiris. 2010. Preparation of bioinorganic fertilizing media by adsorption of humates on lassy aluminosilicates. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces* 81 (2010) 115–122.
- Chen, H., R. Berndtsson, M. Ma y K. Zhu. 2009. Characterization of insolubilized humic acid and its sorption behaviors. *Environ Geol* 57:1847–1853.
- Evangelou, V. P., M. Marsi y M. M. Vandiviere. 1999. Stability of Ca^{2+} -, Cd^{2+} -, Cu^{2+} -[illite-humic] complexes and pH influence. *Plant and Soil* 213: 63–74.
- Flores-Céspedes, F., M. Fernández-Pérez, M. Villafranca-Sánchez, and E. González-Pradas. 2006. Cosorption study of organic pollutants and dissolved organic matter in a soil. *Environ Pollut* 142:449–456.
- Fukushima, M. y K. Tatsumi. 2006. Complex formation of water-soluble iron (III)-porphyrin with humic acids and their effects on the catalytic oxidation of pentachlorophenol, *J. Mol. Catal. A: Chem.* 245, 178–184.
- Gostishcheva, M. V., M. V. Belousov, M. S. Yusubov, R. R. Ismatova y S. E. Dmitruk. 2009. Comparative IR spectral characteristics of humic acids from peats of different origin in the Tomsk area. Vol. 43, No. 7, pp. 44-47.
- Hayes, M. H. B., P. MacCarthy, R. L. Malcolm y R. S. Swift. 1989. The search for structure: setting the scene. In *Humic Substances II: In Search of Structure*; EdsWiley New York, pp 3–31.
- Iakimenko, O. S. 2005. *Use of Humic Substances to Remediate Polluted Environments: From Theory to Practice*, Springer. Printed in the Netherlands. 365–378.
- Juneta, A., B. D. Isabelle, B. Daniel, M. Armand, L. Samuel, M. Christine, B. Jerome, T. Joelle, D. Sylvie, 2013. Characterisation of organic matter from organo-mineral complexes in an Andosol from Reunion Island. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 99. 92–100

- Maccarthy, P. 2001. The principles of humic substances. *Soil Science*. 166:738-751.
- MacCarthy, P. y J. A. Rice. 1985. Spectroscopic methods (other than NMR) for determining functionality in humic substances. Wiley-Interscience, New York, pp. 527– 559.
- Moros, J., P. Herbelo-Hermelo, A. Moreda-Piñeiro, P. Bermejo-Barrera, S. Garrigues y M. de la Guardia. 2008. Screening of humic and fulvic acids in estuarine sediments by near-infrared spectrometry. *Anal. Bioanal. Chem.* 392:541–549.
- Rady, M. M. 2012. A novel organo-mineral fertilizer can mitigate salinity stress effects for tomato production on reclaimed saline soil. *South African Journal of Botany* 81, 8–14.
- Ryabova, I. N. 2010. Organomineral Sorbent from Shubarkol Coal. ISSN 0361-5219, *Solid Fuel Chemistry*, Vol. 44, No. 5, pp. 335–338.
- Peuravuori, J., P. Zbankova y K. Pihlaja. 2006. Aspects of structural features in lignite and lignite humic acids, *Fuel Process Technol.* 87, 829–839.
- Puls, R. W. y H. L. Bohn. 1988. Sorption of cadmium, nickel, and zinc by kaolinite and montmorillonite suspension. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 52, 1289–1292.
- Schnitzer, M. 2000. Life Time Perspective on the Chemistry of Soil Organic Matter. D. L. Sparks (Ed.). *Advances in Agronomy*, Academic Press. 98: 3-58.
- Schnitzer M and Gupta UC. 1965. Determination of acidity in soil organic matter. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 29, 274–277.
- Schulten H-R & Schnitzer M (1993) A state of the art structural concept of humic substances. *Naturwissenschaften* 80: 29-3.
- Sivakova, L. G., N. P. Lesnikova, N. M. Kim, and G. M. Rotova. 2010. Physicochemical Properties of the Humic Substances of Peat and Brown Coal. *Solid Fuel Chemistry*, Vol. 45, No. 1, pp. 1–6.
- Sutton, R. y G. Sposito. 2005. Molecular Structure in Soil Humic Substances: The New View. *Environmental Science and Technology*. Vol. 39. No. 23, pp. 9009-9015.
- Wright JR and Schnitzer M. 1959. Oxygen-containing functional groups in the organic matter of a Podzol soil. *Nature*, London, 184, 1462–1463.

CAPITULO II

COMPORTAMIENTO DE HUMATO DE CALCIO Y FULVATO DE HIERRO EN LA CALIDAD Y PRODUCCIÓN DEL CHILE JALAPENO (*Capsicum annum* L.) Y CHILE PIQUIN (*Capsicum annum* L. *aviculare*) EN UN SUELO CALCISOL

RESUMEN

Con el fin de determinar el comportamiento de un ácido húmico (AH) y ácido fúlvico (AF) enriquecidos con calcio y hierro, en diferentes variables de chile piquín y jalapeño, se establecieron un total de 42 plantas en macetas que contenían 10 kg de suelo de un horizonte Ap 0-30 cm, a cada uno de los tratamientos en sus diferentes combinaciones, se realizaron diferentes aplicaciones de fertilizantes de acuerdo a los lineamientos de la solución nutritiva balanceada, procedimiento Steiner y las mezclas órgano minerales, con una solución nutritiva completa (SNC), una solución química sin Hierro (SNs/Fe) y otra sin Calcio (SNs/Ca); así mismo se aplicó la mezcla órgano mineral AF mezclado con Hierro en concentración de 2 y 6 mL L⁻¹ a pH 6 y 7 y AH mezclado con Calcio a igual concentración y pH. A este cultivar se les midió área radicular (AR), longitud de raíz (LR), altura de planta (AP), diámetro de tallo (DT), capacidad de intercambio catiónico radicular (CICR), rendimiento en dos cortes, vitamina C en ambos cortes y el índice DOP (Desviación Óptima Porcentual). El AF + Fe 2 mL L⁻¹ en pH 6 y 7, influyó en las variables de vitamina C en ambos cortes y el índice DOP.

Palabras clave: *ácidos húmicos adicionados con hierro, ácidos fúlvicos adicionados con calcio, vitamina C, DOP.*

SUMMARY

In order to determine the behavior of humic acid (HA) and fulvic acid (FA) enriched with calcium and iron in different variables of piquín and jalapeno pepper, settled a total of 42 plants in pots containing 10 kg soil Ap horizon of 0-30 cm, each of the treatments in different combinations, there were different fertilizer applications according to the guidelines of the nutrient solution balanced Steiner procedure and organo mineral mixtures, with a complete nutrient solution (CNS), a chemical solution without iron (NSw/Fe) and without calcium (NSw/Ca), likewise the mixture of FA with Ca in concentration of 2 and 6 mL L⁻¹ at pH 6 and 7 and HA mixed with Fe at the same concentration and pH. In this cultivar was measured root area (RA), root length (RL), plant height (PH), stem diameter (SD), cation exchange capacity in root (CECR), fruit yield in two cuts, vitamin C in each fruit yield and the OPD index (Optimal Deviation Percent). The AF + Fe 2 mL L⁻¹ at pH 6 and 7 variables influence of vitamin C in both courts and the OPD index.

Keywords: *humic acids added with iron, fulvic acids added with calcium, vitamin C, OPD.*

I. INTRODUCCIÓN

Las sustancias orgánicas son componentes esenciales del suelo que determinan todas las propiedades específicas de suelo como un cuerpo natural, el humus del suelo es un índice de diagnóstico importante de este que determina la capacidad del suelo para cumplir sus funciones ecológicas y el efecto del uso agrícola en el estado de los suelos; los carbones naturales oxidados contienen grandes cantidades de sustancias húmicas, que poseen muchas propiedades valiosas, incluyendo la capacidad de sorber iones metálicos, al mismo tiempo, son de bajo costo y amables con el ambiente. Las sustancias húmicas han demostrado el estimular el crecimiento de las plantas y la acumulación de nutrimentos. Estudios sobre la cinética de absorción con el uso de inhibidores y las variaciones en las condiciones experimentales (por ejemplo, temperatura) sugieren que los efectos de las sustancias húmicas en la nutrición de las plantas pueden estar mediados por las variaciones en la síntesis y la funcionalidad de los portadores de membrana de síntesis de proteínas, por otra parte, la estimulación del protón activo de las raíces y transmembrana indica una implicación de la membrana plasmática en el aumento de la absorción de nutrientes debido a la presencia de las sustancias húmicas. Muchos autores han observado que las plantas tratadas con moléculas húmicas tienen diferentes tasas de crecimiento y morfología en comparación con plantas control. El tratamiento con estas sustancias modifica la morfología de la raíz, la inducción de proliferación de pelos radicales en regiones subapical y una tasa de mayor diferenciación de células de la raíz, Este tipo de respuestas de raíces de plantas con tratamiento de sustancias húmicas se ha interpretado en términos de una actividad similar a las hormonas de las sustancias húmicas. Los humatos derivados de

diversas fuentes naturales tales como el carbón, turba, sedimentos, materiales de desecho orgánicos y algunos otros componentes, son reportados como eficaces acondicionadores del suelo, en numerosos experimentos de campo y laboratorio con diferentes plantas y especies de cultivo. Se demostró que los humatos de sodio, potasio y amoníaco, no importa las fuentes de materia prima para su producción, cuando se aplica en las tasas óptimas, estimulan significativamente la germinación de semillas y crecimiento de la planta, aumentan la absorción de agua, así como la respiración, longitud y biomasa de brotes y raíces.

El suelo es un medio complejo con alta resolución espacial y variabilidad ambiental temporal en una amplia gama de escalas, incluyendo las que se refieren a las raíces de las plantas, el sistema de raíces con su desarrollo extenso pero estructurado, puede ser considerado como un proceso evolutivo, respuesta a dicha variabilidad espacio temporal en los recursos de suministro y las limitaciones asociadas sobre el crecimiento. La arquitectura de un sistema de raíces es el resultado de los procesos de desarrollo y es un concepto dinámico. La arquitectura de la raíz aborda dos conceptos importantes: la forma del sistema de raíces y de su estructura. La forma define la ubicación de las raíces en el espacio y forma en que el sistema de raíces ocupa el suelo. Su cuantificación se logra generalmente mediante la medición de variables como la profundidad de las raíces, la expansión de las raíces laterales y la densidad. En contraste, la estructura de la raíz describe la variedad de los componentes que la constituyen y su relación (por ejemplo, la topología: conexión entre las raíces y raíces gradientes). La diferenciación tiene importantes impactos sobre las relaciones estructura y función. Dentro de lo que se denomina proceso de

imágenes, se engloban una serie de técnicas que comprenden operaciones cuyo origen es una imagen y cuyo resultado final es otra imagen. El objetivo de estas técnicas es procesar una imagen de tal modo que la resultante sea más adecuada que la imagen original para una aplicación específica. El término "específico" es importante porque establece que el valor de la imagen resultante debe estar en función del problema que se trata. Así, un método que es útil para realizar un determinado tipo de imágenes puede no serlo para otras.

1.1 HIPÓTESIS

- Los humatos de calcio y fulvatos de hierro han mostrado aumentos en la producción de muchos cultivos, por lo tanto su aplicación en chile jalapeño y piquín permitirá determinar su efecto y comportamiento en la producción.
- Los humatos de calcio y fulvatos de hierro, permiten una mejor absorción por la planta en suelos calcáreos, por lo tanto se podrán reducir estas deficiencias.

1.3 OBJETIVO

- Determinar la efectividad y comportamiento de humato de calcio y fulvato de hierro, en la calidad y producción del chile jalapeño (*Capsicum annum L.*) y piquín (*Capsicum annum L. aviculare*).
- Evaluar los humatos de calcio y fulvato de hierro a dos concentraciones, en chile jalapeño y piquín, para resolver las deficiencias de estos elementos.

1.5 META

Obtener la descripción del comportamiento de humato de calcio y fulvato de hierro, en la producción del chile jalapeño y piquín.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

México es el país con la mayor variedad genética de chile, sin embargo China es el mayor productor y en segundo lugar está México (Nar, 2005; SNIIM, 2006). El chile jalapeño (*Capsicum annuum* L.) ocupa el segundo lugar entre las hortalizas comerciales y de exportación. Un método que ha tomado auge en México, es la aplicación de sustancias húmicas (SH) las cuales son los ácidos húmicos (AH), ácidos fúlvicos (AF) y huminas residuales (HR), definidas como macromoléculas orgánicas, con estructura química compleja, distinta y estable. Sus formas originales; provienen de la degradación de residuos de plantas y animales, por la actividad enzimática de microorganismos y metamorfismo orgánicos (Fründ *et al.*, 1994 y Schnitzer, 2000); son la fracción orgánica del suelo más importante por su efecto en la ecología, estructura y fertilidad, así como en el crecimiento de las plantas. El término SH se refiere a materiales derivados de la materia orgánica distribuidos en el suelo, donde las SH son un grupo complejo de alta concentración. Con base en su solubilidad, en condiciones ácidas o alcalinas, las SH se clasifican en tres fracciones (Sutton y Sposito 2005): las huminas son insolubles, los ácidos húmicos (AH) son soluble en medios alcalinos y medios ácidos ($\text{pH} > 2$) aunque no las condiciones ácidas fuertes si el $\text{pH} < 2$, y los ácidos fúlvicos (AF) los cuales son solubles en condiciones alcalinas y ácidas. La clasificación de las tres fracciones es conceptual, y no representa tres tipos distintos de moléculas orgánicas (Hayes *et al.*, 1989), pues las SH suelen incluir un esqueleto de moléculas aromáticas alquilo con grupos funcionales, como ácidos carboxílicos, hidroxilo fenólico, y grupos quinona unidos a ellos.

Estas sustancias están presentes de forma natural en los suelos en forma de residuos orgánicos, contribuyen en los procesos físicos directos o indirectos en el crecimiento vegetal y la adaptabilidad al medio ambiente, mejoran la estabilidad de los agregados del suelo, absorción de nutrimentos (Quaggiotti *et al.*, 2004.), y metabolismo de carbono (Nardi *et al.*, 2007). Hay evidencia que las fracciones de las SH como los AH están dotados con actividades como la auxina (Canellas *et al.*, 2008;), propiedad que también caracteriza a los AF. Basado en este concepto, las propiedades bioquímicas de las moléculas bioactivas forman la estructura supramolecular de las SH relacionadas con sus efectos similares a las hormonas en el desarrollo de la raíz (Canellas *et al.*, 2005). Los efectos hormonales en las plantas han sido descritos dependiendo del origen de las SH (Pizzeghello *et al.*, 2001.), en los residuos orgánicos (Façanha *et al.*, 2002) y el compost de lombriz (Atiyeh *et al.*, 2002).

Los humatos derivados de fuentes como el carbón, turba, sedimentos, residuos orgánicos, y algunos otros componentes, son acondicionadores del suelo efectivos. La influencia positiva de las SH en el crecimiento y desarrollo fue descubierto a finales del siglo XIX y más tarde apoyado en las obras clásicas de Kononova 1966. Desde 1960, donde la naturaleza de estas investigaciones se han acumulado en los siguientes reportes (Chen *et al.*, 1990; Chukov, 2001). Diferentes humatos, han mostrado mejorar el crecimiento y desarrollo de las plantas, aumentando la resistencia de estas a condiciones ambientales desfavorables, y actuando de manera similar a las SH naturales (Piccolo *et al.*, 1997). En campo y laboratorio con diferentes pruebas y especies de cultivos, han demostrado que los humatos de sodio, potasio y amoníaco, cuando fueron aplicados en dosis 50-100 mg L⁻¹ o 10 a 100 kg ha⁻¹, estimulan

significativamente la germinación de las semillas y crecimiento de las plantas (Ulanov, 1993), aumento de absorción de agua, respiración, longitud y biomasa de los brotes y las raíces (Noble *et al.*, 1995). Se atribuye una mayor eficiencia estimulante a los humatos en el crecimiento de la planta en comparación a las SH en el suelo *in vivo*, más a menudo se atribuye a su estructura química en particular (Lozanovskaya *et al.*, 1991) y/o a su influencia fisiológica (Gorovaya *et al.*, 1995). Los humatos son una alteración de las partidas de materias primas iniciales en su producción debido a una serie de procesos tales como la ruptura de las interacciones órgano-minerales, hidrólisis y oxidación, todavía pertenecen a la clase de compuestos de SH, pero su configuración ha cambiado, lo que les permite ser activado. El número de mecanismos fisiológicos en las plantas con influencia de las SH, son tales como la mitigación del efecto de los inhibidores de la respiración, lo que acelera la síntesis de proteínas, que afectan las reacciones metabólicas, o actuar de manera similar a sustancias de tipo hormonal (Gorovaya *et al.*, 1995). Autores han reportado que las SH influyen en el crecimiento de la planta debido a su influencia indirecta sobre las propiedades del suelo, como un aumento de la agregación, aireación, permeabilidad (Rauthan y Schnitzer, 1981), absorción de los nutrientes, y mejorar la distribución de iones metálicos dentro de la planta debido a la formación de quelatos (Kononova, 1966).

Se ha despertado un gran interés en la producción de fertilizantes húmicos en todo el mundo, la experiencia con el uso de fertilizantes húmicos en la agricultura ha permitido producir humatos de varias materias primas orgánicas, a partir de turba, leonardita, y otro tipo de lignitos (Lobartini *et al.*, 1992). Además de los nutrientes, los acondicionadores de varios regímenes especiales de la producción resultó en una gran

variedad de humatos destinados a diferentes tareas: la fertilización, recuperación de suelos degradados, absorción de sustancias tóxicas, y estimuladores del crecimiento de plantas (Lobartini *et al.*,1992; Piccolo *et al.*,1997; Ulanov, 1993).

Lo anterior concuerda con Evangelou *et al.* (2004), donde comentan que los compuestos húmicos, dentro de sus características, poseen una gran cantidad de grupos funcionales oxigenados, grupos carboxilos (COOH^-), carbonilos (COO^-) y oxhidrilos (OH^-), tienen la particularidad de complejar y/o quelatar cationes y en la solución del suelo, llevarlos a la pared celular de la raíz, similar a agentes quelatantes y/o complejantes y ser transportados los nutrimentos por el torrente xilemático hacia zonas de crecimiento. Con lo anterior, la adición de ácidos orgánicos aumenta la absorción de nutrimentos, también los órganos de la planta en su crecimiento (Ray y George, 2010).

Los rasgos arquitectónicos de raíz son importantes para la selección de cultivos y variedades que son eficientes en la adquisición de determinados nutrimentos del suelo (Rubio *et al.*, 2003) y en ambientes limitados de agua (Manschadi *et al.*, 2006). Al igual que algunas plantas producen raíces de mayor diámetro para facilitar la penetración de las zonas densas de suelo, por lo que otras plantas producen raíces en diferentes ángulos para facilitar la exploración de los recursos en las regiones de suelos que son capaces de acceder (Lynch *et al.*, 1993).La superficie de la raíz, estimable con la longitud y el diámetro, determina la capacidad de las plantas para absorber agua y nutrientes (Barber, 2005),mientras que la biomasa de raíces, refleja la división de carbono, determina la construcción de la biomasa y mantenimiento de esta (Bouma *et al.*, 1996).La estimación de la longitud de la raíz se basa en métodos

tradicionales de alineación que se cruzan (Tennant, 1975), que se llevan a cabo de forma manual o automática (escáneres de longitud de la raíz). La medición de la longitud y el diámetro de las raíces en las muestras de barrena es generalmente laborioso y consume mucho tiempo cuando un gran número de muestras tiene que ser medido y es necesaria la clasificación de las raíces en clases de intervalos de diámetro, el tiempo para la medición puede aumentar aún más. Estos métodos están ahí antes de ser reemplazados progresivamente por procedimientos más rápidos y precisos análisis de imágenes digitales, es decir, matrices de píxeles (elementos de imagen).

Recientemente resumidos por Richner *et al.* (2000), los métodos actuales para la estimación de la longitud de la raíz en las imágenes digitales se basan en dos enfoques principales: (a) esqueletización objeto, es decir, la reducción de un objeto a una línea de 1 píxel de ancho siguiendo su eje central principal y la medición directa de los longitud del esqueleto, (b) evaluación de la longitud indirectamente del cálculo de áreas y perímetros de objetos en primer plano. En este sentido, se han propuesto varios algoritmos para el cálculo de perímetros. La mayoría de ellos pueden ser clasificados como "métodos en cadena" (Kimura *et al.*, 1999). Estos se basan en la clasificación de los píxeles del borde de un objeto y se derivan de Freeman (1970), con modificaciones sucesivas de otros autores. Un enfoque diferente ha sido propuesto recientemente por Ewing y Kaspar (1995), que introdujo la ECA (Algoritmo Acorde al Borde) como un mejor estimador del perímetro de los objetos no orientados al azar.

Los minirizotrones permiten observaciones continuas y no destructivas de las raíces, lo que lleva a la adquisición de un gran número de imágenes de raíz (Upchurch y Ritchie, 1983). Aunque las imágenes pueden ser analizadas directamente en el

campo, más a menudo se registran en una cinta de vídeo, para facilitar el análisis en el laboratorio más tarde. Además, relativamente nuevos métodos tales como técnicas de minirhizotron (Hendrick *et al.*, 1992) no están disponibles para su uso en estudios anteriores sobre los efectos de adelgazamiento radicular (Schilling *et al.*, 1999), estos utilizan, la tecnología no destructiva para la medición y el seguimiento de la producción, así como el crecimiento y la renovación de raíces de las plantas en los ecosistemas naturales y experimentales (Phillips *et al.*, 2000). La gran cantidad de datos capturados en los minirizotrones presenta un reto para los investigadores, que tradicionalmente han anotado tales imágenes con la mano, un proceso laborioso y lento que puede consumir miles de horas por experimento. Esta dificultad ha motivado a varios investigadores a estudiar la forma de extracción automática de información de raíz de las imágenes de la raíz sin anotación manual (Andren *et al.*, 1996). Estos métodos se han centrado principalmente en la estimación de la longitud total de la raíz, en lugar de la identificación y medición de la longitud de las raíces individuales en cada imagen. (Zeng *et al.*, 2006).

Se ha sugerido que la técnica minirhizotron puede estimar las tasas de producción de raíces finas con menos error, porque nos permite observar la producción, mortalidad y desaparición de raíces finas individuales en forma no destructiva. Por otro lado, el método de crecimiento hacia dentro del núcleo del suelo, por ejemplo, podría subestimar las tasas de producción de raíces finas, especialmente en sitios con una alta mortalidad de raíces finas, porque no es capaz de tener en cuenta la producción de raíces finas que murieron o desaparecieron durante los períodos de latencia (Zeng *et al.*, 2006). Cheng *et al.* (1991) desarrollaron técnicas para la evaluación de la

demografía de la raíz y su dinámica basada en el trazado manual de raíces en hojas transparentes. Hendrick y Pregitzer (1993) midieron la longitud de raíz mediante la aplicación de un procedimiento interactivo, aprovechando las raíces individuales de forma manual con un ratón de PC. Este método aumenta la precisión, pero a menudo requiere más tiempo que un recuento manual.

Dado que el método ordinario de contar manualmente las raíces (Upchurch, 1987) es tedioso, consume tiempo y es que no siempre se correlaciona con la longitud de la raíz. La digitalización directa de imágenes en el campo y la aplicación de técnicas automáticas de análisis de imagen puede ser muy útil para acelerar la investigación de raíz. Cuando se trata de imágenes de raíz de pared transparente, el principal problema es reconocer las raíces con respecto al fondo, que a menudo incluye objetos extraños (partículas más ligeras del suelo, gotitas de agua, insectos, etc.). La única manera de discriminar raíces contra objetos extraños es considerar todas las posibilidades. Los métodos tradicionales de reconocimiento de características son técnicas globales como umbral, lo que produce una imagen binaria, objetos de luz (raíces, partículas extrañas) se conviertan en blanco y el fondo puede ser convertido a un color negro.

Los dispositivos más comunes para registrar imágenes de las raíces lavadas son cámaras o escáneres electrónicos, ambos basados en CCD (dispositivo de carga acoplada) sensores, que deben tener una resolución suficiente para obtener imágenes de las mejores raíces completamente, de otro modo se corre el riesgo de subestimar su longitud. Aunque los escáneres planos estándar se utilizan con frecuencia para la adquisición de la imagen de raíces se extienden sobre bandejas transparentes en una capa delgada de agua (Smit *et al.*, 1994), que tienen el inconveniente de producir

imágenes que son demasiado grandes en el tamaño de la memoria. Las cámaras digitales también se han utilizado y cuando se monta en un X-Y de pórtico móvil, conducen a una mayor resolución que los escáneres, pero a menudo producen muchas imágenes por muestra de raíz. Los detalles de los procedimientos de exploración, incluyendo las propiedades de imagen (por ejemplo, la resolución óptica y formato) a menudo se omiten por los autores, aunque algunos de estos afectan en gran medida el análisis. Smit *et al.* (1994) informaron de que es necesaria la resolución máxima de gris (256 niveles), que corresponde a imágenes de 8 bits, para obtener resultados satisfactorios.

Métodos automatizados actuales para medir las características geométricas de las raíces de las imágenes digitales hacen uso de las operaciones preliminares de mano de obra, como la decantación (para la separación de pequeñas piedras), las técnicas de flotación y extracción manual de grandes objetos extraños (por ejemplo, residuos de cosechas) (Dowdy *et al.* 1998). Hasta ahora, sólo unos pocos informes han sugerido formas alternativas de raíces discriminatorias de desechos orgánicos no deseados, y se basan en diferentes valores de los parámetros geométricos, como la relación entre longitud y anchura (Dowdy *et al.* 1995), en lugar de en las características cromáticas. Las técnicas de tinción que aumentan el contraste de fondo y la raíz, la disposición meticulosa de raíz en bandejas escáner también se mencionan en la literatura como útiles antes de las operaciones de digitalización de la imagen (Ritchner *et al.*, 2000). La grabación de imágenes requiere una considerable capacidad de memoria de la computadora con una resolución óptica alta. En comparación con las imágenes blanco y negro (1 bit o binario), imágenes en color o escala de grises

proporcionan más información, pero requieren capacidad adicional de almacenamiento (por ejemplo, discos compactos). Además, pueden reducir la velocidad de procesamiento notablemente debido a su manejo más complejo. La mayor parte del software de análisis de imagen que se utiliza para las mediciones de la raíz se ha desarrollado específicamente para medir los principales parámetros de raíz (área, longitud, diámetro). Algunos de los que no tiene opciones de prórroga escritos por el usuario, por lo que su uso se limita a las muestras estándar. Otro software tiene una arquitectura abierta (por ejemplo, NIH Image), de modo que las funciones de macro tarea-específicos pueden ser escritas y grabadas (Smit *et al.*, 1994).

Actualmente existe un acuerdo general en que las raíces finas juegan un papel clave en la dinámica del carbono y de los nutrientes de los ecosistemas (Noguchi *et al.*, 2007). El control fisiológico de la producción de raíces finas y las tasas de mortalidad deben ser estudiados para comprender mejor los mecanismos de crecimiento, ciclo del carbono y la dinámica de nutrientes (Hishi *et al.*, 2005). La capacidad de una planta para posicionar sus raíces en el suelo donde el agua y los nutrientes disponibles son vitales para su crecimiento y supervivencia, pero los métodos para evaluar este aspecto del crecimiento de raíz son pocos y la plasticidad fenotípica de los sistemas de raíces en diferentes medios de cultivo tiene rutina limitada de cribado. Muchos estudios de crecimiento de las raíces se han llevado a cabo en condiciones controladas utilizando plantas de semillero jóvenes cultivadas en medios homogéneos, tales como geles, hidroponía o arena (Bengough *et al.*, 2004). Las raíces de las plántulas se pueden cribar rápidamente en dichos medios y la longitud de la raíz y tasas de elongación de las raíces individuales se pueden determinar con relativa facilidad. Por

ejemplo, las raíces que crecen a lo largo de la superficie de agar o en el papel de germinación humedecido con solución de nutrientes son utilizados para el análisis de crecimiento; las imágenes 2D facilitan la identificación de zonas con diferentes tasas de crecimiento y curvatura (Basu *et al.*, 2007). Los cultivos de arena y el suelo como el usado por Liao *et al.* (2001 a/b), permiten que los ángulos se miden a una profundidad única o punto de salida de la tierra, sino que implican análisis destructivo si otras características como la longitud y ramificación se evalúan. Por otra parte, la medición en un solo punto no incluye información con respecto a la naturaleza tortuosa del crecimiento de la raíz alrededor de pequeños agregados o zonas compactadas antes de llegar a ese punto.

La variabilidad genotípica en características de las raíces se ha documentado en muchas especies de plantas, por ejemplo, se han encontrado diferencias en el número de raíces, longitud y propagación (Forster *et al.*, 2005). Sin embargo, ha habido pocas comparaciones publicadas de la estabilidad de los rasgos en diferentes etapas de crecimiento o en diferentes medios de cultivo (Gregory, 2006). Wahbi y Gregory (1989) encontraron diferencias en el crecimiento de las raíces de plántulas entre 48 genotipos de cebada cuando se cultiva en solución nutritiva o en una mezcla de arena y perlita. En un estudio más detallado de los seis genotipos, las plantas que crecen en suelo y en solución nutritiva, tenían raíces laterales ya que las cultivadas en una mezcla de arena y perlita, la clasificación de los genotipos para longitud total de raíces por planta fue similar en todos los medios. Muchas características de las raíces parecen ser poligénicas y las condiciones de crecimiento pueden afectar la expresión del gen, por lo

tanto la morfología de la raíz con respuesta por ejemplo, a la escasez de agua (Price *et al.*, 2002).

La capacidad de intercambio catiónico de raíces (CICR) se ha observado como una propiedad importante de las plantas y se ve muy afectada por la edad de la planta y la absorción de nutrientes. Esto determina un diferencial en atracción eléctrica de cationes monovalentes y polivalentes a las superficies de la raíz de carga negativa. Donde se considera como la cantidad de grupos carboxilo libres de ácidos galacturónico de las pectinas de la pared celular en la lamela media. Hallazgos recientes sugieren que la CICR depende en gran medida de la reacción del entorno en una adsorción selectiva de diferentes iones minerales que se rige por su capacidad de intercambio catiónico. La CICR es una medida reproducible que es específica de la especie, con grandes diferencias entre las plantas, en monocotiledóneas sólo tienen la mitad de la CICR que las dicotiledóneas. Este intercambio explica la acumulación de iones en la superficie de la raíz, pero no es esencial para la absorción de nutrientes, lo cual no es constante y es muy sensible a los factores ambientales. Las relaciones entre el medio ambiente y el papel de la raíz en el intercambio catiónico en la absorción de nutrientes, donde las consecuencias ecológicas de esta propiedad de las raíces a las asociaciones e interacciones de las especies de plantas en las comunidades naturales y la aplicación de este conocimiento en los sistemas de producción mixtos sostenibles son cuestiones no resueltas. Por lo tanto, habría una correlación definida entre la capacidad de intercambio catiónico de raíz y absorción de nutrientes en las diferentes etapas de crecimiento fisiológico de las plantas de cultivo que han sido expresadas por muy pocos investigadores.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Ubicación del Área Experimental

El estudio se llevó a cabo en el vivero de planta nativa de las instalaciones de la Facultad de Agronomía de la Universidad Autónoma de Nuevo León. El clima predominante en el área es semiseco muy cálido con lluvia en verano. Las temperaturas medias oscilan entre 14.7 °C en el mes de enero y 22.3 °C en el mes de agosto. Los meses más cálidos son junio, julio y agosto, con una temperatura media mensual que oscila entre 27 y 28 °C y el mes más frío es enero, con una temperatura media menor de 15 °C, sin embargo, es común observar en el verano (junio-agosto) temperaturas máximas extremas de 44 °C y en el invierno (enero-marzo) temperaturas de -3 °C. La precipitación anual fluctúa de 700 a 1200 mm. El máximo régimen pluvial mensual se registra en septiembre con promedio de 160 a 170 mm y el mínimo de 10 a 15 mm se presenta en marzo (SNM, 2010).

3.2 Diseño Estadístico

Se establecieron dos experimentos independientes uno para chile jalapeño y otro para chile piquín. Se manejaron de acuerdo a un diseño experimental completamente al azar con dos niveles de aplicación de AH y AF (2 y 6 mL L⁻¹), dos nutrientes (Ca y Fe), para la fertilización química se utilizó un Tratamiento con una solución nutritiva completa (SNC), otro Tratamiento de solución nutritiva sin hierro (SNs/Fe) y finalmente un Tratamiento de solución nutritiva sin calcio (SNs/Ca), lo

que dio un total de 7 Tratamientos. Estos Tratamientos se trabajaron a dos diferentes niveles de pH (6 y 7) como experimentos diferentes, dando un total de 14 tratamientos y 4 repeticiones, para cada cultivar (Chile Jalapeño y Piquín). La distribución de Tratamientos se puede observar en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Distribución de tratamientos para chile jalapeño y piquín.

| Tratamientos | Experimento 1. Chile Jalapeño | | Experimento 2. Chile Piquín | |
|--------------|-------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| | pH 6 | pH 7 | pH 6 | pH 7 |
| 1 | AF + Fe 2 mL L ⁻¹ | AF + Fe 2 mL L ⁻¹ | AF + Fe 2 mL L ⁻¹ | AF + Fe 2 mL L ⁻¹ |
| 2 | AF + Fe 6 mL L ⁻¹ | AF + Fe 6 mL L ⁻¹ | AF + Fe 6 mL L ⁻¹ | AF + Fe 6 mL L ⁻¹ |
| 3 | SNs/Fe | SNs/Fe | SNs/Fe | SNs/Fe |
| 4 | AH + Ca 2 mL L ⁻¹ | AH + Ca 2 mL L ⁻¹ | AH + Ca 2 mL L ⁻¹ | AH + Ca 2 mL L ⁻¹ |
| 5 | AH + Ca 6 mL L ⁻¹ | AH + Ca 6 mL L ⁻¹ | AH + Ca 6 mL L ⁻¹ | AH + Ca 6 mL L ⁻¹ |
| 6 | SNs/Ca | SNs/Ca | SNs/Ca | SNs/Ca |
| 7 | SNC | SNC | SNC | SNC |

AF. Ácidos Fúlvicos; AH. Ácidos Húmicos; SNC. Solución; Nutritiva Completa; SNs/Ca. Solución Nutritiva sin Calcio; SNs/Fe. Solución Nutritiva sin Hierro.

El análisis estadístico consistió en el análisis de varianza (ANVA) con la posterior aplicación de la prueba de rangos múltiples de Tukey ($P < 0.05$): También para las variables que mostraron diferencias significativas en los tratamientos, se empleó el software estadístico MINITAB Versión 15.

3.3 Fertilización aplicada a los tratamientos

La fertilización química se realizó de acuerdo a los lineamientos de la solución nutritiva balanceada, procedimiento Steiner; dando la siguiente relación de nutrimentos, para una solución de 10 litros (Cuadro 2).

Cuadro 2. Fertilización aplicada a los tratamientos de acuerdo a la propuesta de solución nutritiva de Steiner.

| Fertilizante | Cantidad (10 l) |
|-----------------------------------|------------------------|
| HNO ₃ | 1.84 g |
| Ca(NO ₃) ₂ | 2.90 g |
| K NO ₃ | 2.78 g |
| MgSO ₄ | 0.86 g |
| KH ₂ PO ₄ | 0.95 g |
| CuSO ₄ | 2 mL L ⁻¹ |
| FeSO ₄ | 2 mL L ⁻¹ |
| ZnSO ₄ | 1 mL L ⁻¹ |
| H ₃ BO ₃ | 0.2 mL L ⁻¹ |

A la segunda y tercera aplicación se aumento un gramo, a cada uno de los siguientes fertilizantes Ca(NO₃)₂, KNO₃, MgSO₄ y KH₂PO₄, y se disminuyeron un gramo el CuSO₄ y FeSO₄, los demás continuaron aplicándose de manera similar, se llevó a cabo de esta manera ya que Steiner nos indica que nosotros podemos seguir la formula o procedimiento que se ajuste a nuestras necesidades, por el hecho de que existen cientos de formulaciones y nuestra interpretación de alguna fórmula se tiene que ver reflejada en los resultados sin exceder las cantidades de nutrimentos en los cuales pueda ocurrir una lixiviación o toxicidad..

Las plantas de chile se trasplantaron en bolsas de plástico negro para vivero con medidas de 15 cm de ancho con 5 cm de pliegue y 20 cm de altura, el mes de Abril los cultivares de chile jalapeño (*Capsicum annuum* L. var. M) y chile piquín (*Capsicum*

annuum L. var. avicualre), las que contenían 1 kg de sustrato turba (peat moss) Canadian Sphangnum.

Se realizaron tres aplicaciones de fertilizantes, la primera al momento del trasplante, la segunda a la emergencia del primer par de hojas verdaderas, y la tercera a la formación del segundo par de hojas verdaderas.

Los riegos aplicados fueron ligeros y diarios en las mañanas de 7-8 am, de 5-15 mm de lámina para ambos cultivares, lo cual benefició a contrarrestar las altas temperaturas de 30 a 40 °C y así evitar estrés hídrico y muerte de la planta.

Las plantas de chile jalapeño y piquín se trasplantaron el mes de Junio en macetas que contenían 10 kg⁻¹ de suelo de un horizonte Ap 0-30 cm, la fertilización química se realizó de acuerdo a los lineamientos de la solución nutritiva balanceada, procedimiento Steiner (Cuadro 3 y 4).

La fórmula para el fertirriego de este cultivar está tomada en base a un cultivo de chile jalapeño, adaptado a climas cálidos y con resistencia a la sequia. La fertilización como el riego fue aplicada en las diferentes etapas fisiológicas de la planta.

Cuadro 3. Análisis de Fertilidad a 0-30 cm del suelo utilizado para el experimento.

Facultad de Agronomía, Campus Marín.

| Determinación | Valor | Clasificación |
|---------------|------------|--|
| Azufre | 2.77 ppm | Muy Bajo |
| Fosforo | 4.16 ppm | Muy Bajo |
| Calcio | 2920 ppm | Medio |
| Zinc | 0.66 ppm | Muy Bajo |
| Cobre | 0.44 ppm o | Bajo |
| Magnesio | 303.37 ppm | Medio |
| Hierro | 2.68 ppm | Muy Bajo |
| Manganeso | 3.28 ppm | Bajo |
| Potasio | 22.4 ppm | Muy Bajo |
| Boro | 0.89 ppm | Mod. Bajo |
| N. Inorg. | 8.78 | De N Disponible kg ha ⁻¹ |

Cuadro 3a. Variables físicas 0-30 cm del suelo utilizado para el experimento.

Facultad de Agronomía Campus Marín.

| Determinación | Valor |
|--------------------------|---------------|
| pH agua | 8.8 |
| % Arena | 5.70 |
| % Limo | 39.62 |
| % Arcilla | 54.68 |
| Clasificación | Arcilloso |
| % H. CC | 26.70 |
| % H. PMP | 14.01 |
| D. A. g cm ⁻¹ | 1.370 |
| % M. O. | 0.39 Muy Bajo |
| % Carbonatos | 3.97 Calizo |

Cuadro 4. Diagnostico de Salinidad y Sodicidad en Extractos de Saturación

| | Valor | Clasificación |
|----------------------------------|-------|----------------|
| Conductividad Eléctrica | 0.361 | No Salino |
| pH | 8.3 | Alcalino |
| Calcio meq L ⁻¹ | 2.486 | Muy Bajo |
| Magnesio meq L ⁻¹ | 1.130 | Muy Bajo |
| Sodio meq L ⁻¹ | 3.553 | Medio |
| Potasio meq L ⁻¹ | 1.279 | Muy Bajo |
| Carbonatos meq L ⁻¹ | 0.0 | --- |
| Bicarbonatos meq L ⁻¹ | 1.296 | Bajo |
| Sulfatos meq L ⁻¹ | 5.716 | Bajo |
| RAS | 2.642 | Medio en Sodio |
| Cloruros meq L ⁻¹ | 1.760 | Bajo |

3.4 Lavado de Raíz

Al momento del establecimiento del cultivo como primera etapa en el mes de Abril del 2011 y segunda etapa el mes de Diciembre de 2011, se estudió la masa radicular para ambos cultivares, por el método de análisis digital mediante lavado de raíz, el cual consistió en retirar la bolsa de cada cultivar, envolviendo la raíz con sustrato en una tela de algodón (100 x 100cm) y esta se dejó reposar en un recipiente de 100 l con agua, a 1-2 cm arriba del cuello de la raíz durante 10 minutos. Una vez humedecido el suelo de la planta se retiró cuidadosamente para no dañar los pelos radiculares en un recipiente (20 l) por separado; al contar con la raíz libre de sustrato se procedió a un tercer lavado con ácido acético (vinagre comercial de manzana) para contrastar el material mineral del sustrato y la fase viva de la raíz y eliminar los residuos

de sustrato presentes en la raíz. Un cuarto lavado se le practicó en otro contenedor (20 l) para eliminar los últimos residuos de vinagre y sustrato.

El lavado de raíz consistió en retirar el suelo de la maceta (25 x 30 cm), con agua a presión con la gota lo mas pulverizada posible, al contar con la raíz libre de suelo se procedió a un segundo lavado con ácido acético (vinagre comercial de manzana) para contrastar el material mineral del suelo y la raíz con esto para eliminar los residuos presentes en la raíz.

3.5 Captura de Imagen

Para la digitalización de raíz se utilizó una cámara Sony Alpha DSLRA350K 24 MP Digital SLR CCD. Se colocaron pliegos de papel milimétrico para usarlo como guía de medición y la raíz con mayor longitud visible, esto para tomarla de cuadro base, la cual se adhirió en la pared con cinta adhesiva sobre una superficie blanca de papel lustrina; todas las fotografías se capturaron a la misma distancia para obtener un igual número de pixeles y área del papel milimétrico, bajo la forma de una matriz rectangular de 500 x 700 mm, con una resolución por foto de 4592 x 3056 pixeles.

3.6 Análisis de Imagen

El análisis de imagen se llevó a cabo con el programa Image Pro Plus v 6.0 (Media Cibernética Maryland, USA), el cual consistió en la obtención de la fotografía en formato JPG, el cual es el formato comprimido más popular, compatible con gran

número de programas; los datos son comprimidos para eliminar información no detectable por el ojo humano.

En las imágenes binarias generadas, esta utilizada para la interpretación de los resultados se cuantifico:

- a) Área Radicular (AR).
- b) Longitud de Raíz (LR).
- c) Cuello de Raíz (CR).
- d) Altura de Planta (AP).

3.7 Capacidad de intercambio catiónico radicular

Una vez realizado el análisis radicular por medio digital, se llevo a cabo la medición de la capacidad de intercambio catiónico en raíz de acuerdo al método de Crooke 1964. Dicho método consiste en el secado de las raíces en una estufa a 80° C por 24 h, se tomaron 200 mg de muestra y se hicieron pasar por un tamiz de 0.7-1 mm; se humectaron las raíces con unas gotas de agua bidestilada, y se le adicionaron 200 ml de HCL 0.01 N. Después de este paso se agitaron durante 5 minutos a 8 rpm, se filtro la solución y se lavó con 300 mL de agua bidestilada. Al material filtrado se le adiciono 200 mL de KCl 1 M ajustado el pH a 7, ya ajustado el pH se tituló con KOH 0.01 N hasta llegar a pH 7, por cada mL de KOH gastado en la titulación se multiplico por 1000 para obtener mili equivalentes.

3.8 Determinación de la concentración de nutrimentos segunda etapa

Durante dos floraciones antes de cosecha, se muestreó peciolo y hoja para conocer la cantidad de elementos que estos contienen mediante el análisis DOP (Desviación del Óptimo Porcentual), el cual consistió en tomar 1 g de follaje por cada tratamiento, lavándolo y enjuagándolo solo una ocasión con agua bidestilada y jabón libre de fósforo, se calcinó el componente foliar durante 2 h en mufla marca FELISA modelo FE-361, al término de este proceso la ceniza del follaje de los tratamientos se diluyó con 1 ml de ácido sulfúrico (H_2SO_4) y aforando el concentrado en 100 mL L^{-1} de agua bidestilada para posteriormente leer en el espectrofotómetro de absorción atómica -EAA- vía húmeda los elementos K, Ca, Mg, Fe, Cu y Zn (Hanlon, 1997), para el análisis del N se utilizó la metodología de micro-kjeldahl, propuesta por Muller (1961), y para P se utilizó la metodología de Syltie *et al.* (1972).

El índice DOP es definido como la Desviación Porcentual de la Concentración de un elemento con respecto a la concentración óptima considerada valor de referencia, en este estudio el valor de referencia fue tomado del libro Plant Analysis and Interpretation Manual Reuter & Robinson 1986; el índice DOP se calculo aplicando la siguiente relación:

$$DOP = [(C * 100) / C_{ref}] - 100$$

Donde:

C: es la concentración del elemento en porcentaje de materia seca en la muestra analizada.

Cref: es el óptimo del mismo elemento (porcentaje sobre materia seca) definido en las mismas condiciones en que fue tomada la muestra y para el mismo cultivo.

Calculando este DOP para cada uno de los elementos mencionados, dispondremos de un panorama nutricional de la condición nutricional de la planta y así poder emitir con rapidez, un diagnóstico que permite un adecuado análisis de los resultados y adecuada toma de decisiones; los valores negativos del índice DOP muestran una situación déficit y positivos un exceso del elemento correspondiente, lógicamente cuando este índice sea cero al elemento se halla en óptima concentración.

3.9 Rendimiento

El rendimiento de frutos por tratamiento se determinó en cosecha, al pesar todo el producto por planta en una báscula Ohaus modelo 3729 con capacidad máxima de 3000 g y resolución de 0.1 g.

3.10 Determinación de vitamina C

De las dos cosechas realizadas, se analizó el contenido de vitamina C, utilizando el método reportado por Padayatt *et al.* (2001). Se maceró 1 mg de muestra con 10 ml de ácido clorhídrico al 2 %. Se homogeneizó la mezcla en 40 mL de agua destilada. Se filtró a través de gasa y se colectó en un matraz Erlenmeyer. Se tomaron 10 mL del sobrenadante y se titularon con 2,6 – diclorofenolindofenol (1×10^{-3} N), cuando la

solución alcanzó un color rosa. El contenido de vitamina C se determinó utilizando la siguiente fórmula descrita por los autores del método referido:

$$\text{Vitamina C} = \frac{(\text{mL utilizados de 2,6 diclorofenolindofenol} \times 0.088 \times \text{volumen total} \times 100)}{(\text{Volumen de la alícuota} \times \text{peso de la muestra})}$$

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Primera Etapa

4.1.1 Chile Jalapeño pH 6

En cuanto a los resultados obtenidos con los tratamientos a pH 6 en chile piquín, en la variable de área radicular, con la incorporación del tratamiento 1 la diferencia fue altamente significativa por encima de la SNC en un 317 %, seguido del 4; en cuanto a la longitud de raíz de igual manera con el tratamiento 1 se obtuvo la mayor longitud superando a la SNC en un 14 %, de manera similar seguido del tratamiento 4; como en las variables anteriores el comportamiento fue análogo con la adición del tratamiento 1 en la altura de planta se encontraron diferencias estadísticas, así mismo, en el diámetro de tallo el tratamiento 1 resulto superior sobre el 7 que representa la SNC en un 137 % (Cuadro 5).

Cuadro 5. Comparación de medias de las variables de chile jalapeño a pH 6.

| Trat. | Descripción | Área de Raíz mm ² | Longitud de Raíz | Altura de Planta | Diámetro de Tallo |
|-------|------------------------------|------------------------------|------------------|------------------|-------------------|
| 1 | AF + Fe 2 mL L ⁻¹ | 5892.4 A | 513.8 A | 473.1 A | 6.6 A |
| 2 | AF + Fe 6 mL L ⁻¹ | 2219.7 B | 358.1 B | 411.4 AB | 5.2 B |
| 3 | SNs/Fe | 1635.1 C | 310.8 C | 378.1 C | 4.9 C |
| 4 | AH + Ca 2 mL L ⁻¹ | 2976.7 B | 375.1 B | 407.7 AB | 4.5 C |
| 5 | AH + Ca 6 mL L ⁻¹ | 1578.6 C | 205.1 D | 272.6 D | 3.6 D |
| 6 | SNs/Ca | 2715.5 B | 346.1 B | 322.7 C | 4.4 C |
| 7 | SNC | 1855.4 C | 350.5 B | 405.2 AB | 4.8 C |
| Sign. | | 0.837 | 0.556 | 0.222 | 0.218 |
| CV | | 69.8 | 28.5 | 21.9 | 21.6 |

4.1.2 Chile Jalapeño pH 7

En cuanto a los tratamientos a pH 7 para las variables de longitud de raíz, altura de planta y diámetro de tallo el tratamiento órgano mineral 4 fue el sobresaliente en estas variables por encima del tratamiento 7 en un 105, 102 y 127 % respectivamente, sin embargo este comportamiento no se vio reflejado en área de raíz ya que el tratamiento con el elemento faltante estadísticamente sobresaliente fue el 3 (Cuadro 6).

Cuadro 6. Comparación de medias de las variables de chile jalapeño a pH 7.

| Trat. | Descripción | Área de Raíz mm ² | Longitud de Raíz | Altura de Planta | Diámetro de Tallo |
|-------|------------------------------|------------------------------|------------------|------------------|-------------------|
| 1 | AF + Fe 2 mL L ⁻¹ | 2291.2 AB | 294.4 C | 354.2 B | 4.1 B |
| 2 | AF + Fe 6 mL L ⁻¹ | 1859.1 B | 364.7 A | 376.9 B | 5.7 AB |
| 3 | SNs/Fe | 2715.5 A | 346.1 B | 378.1 B | 4.4 B |
| 4 | AH + Ca 2 mL L ⁻¹ | 2503.5 AB | 368.1 A | 413.9 A | 6.1 A |
| 5 | AH + Ca 6 mL L ⁻¹ | 1164.8 C | 365.1 A | 269.8 C | 4.3 B |
| 6 | SNs/Ca | 1635.1 B | 310.8 BC | 322.7 B | 4.9 B |
| 7 | SNC | 1855.4 B | 350.5 B | 405.2 A | 4.8 B |
| Sig. | | 0.260 | 0.733 | 0.078 | 0.282 |
| CV | | 53.6 | 21.7 | 23.3 | 18.3 |

4.2 Primera Etapa Chile Piquín

4.2.1 Chile Piquín pH 6

En cuanto a los tratamientos a pH 6 en chile jalapeño para las variables de área de raíz, altura de planta y diámetro de tallo el tratamiento órgano mineral 4 fue el sobresaliente en estas variables por encima del tratamiento 7 en un 123, 125 y 134 % respectivamente, sin embargo este comportamiento de un solo compuesto órgano mineral sobresaliente no se vio reflejado en área de raíz ya que la mezcla estadísticamente sobresaliente fue la 4 superando en un 123 % la variable de área de raíz del tratamiento 7 (Cuadro 7).

Cuadro 7. Comparación de medias de las variables de chile piquín a pH 6.

| Trat. | Descripción | Área de Raíz mm ² | Longitud de Raíz | Altura de Planta | Diámetro de Tallo |
|-------|------------------------------|------------------------------|------------------|------------------|-------------------|
| 1 | AF + Fe 2 mL L ⁻¹ | 2012.4 B | 221.3 AB | 344.8 B | 4.3 B |
| 2 | AF + Fe 6 mL L ⁻¹ | 1175.5 D | 217.1 AB | 309.1 C | 4.4 B |
| 3 | SNs/Fe | 1753.1 C | 212.6 AB | 340.8 B | 4.3 B |
| 4 | AH + Ca 2 mL L ⁻¹ | 2651.4 A | 212.6 AB | 412.3 A | 5.5 A |
| 5 | AH + Ca 6 mL L ⁻¹ | 1623.8 C | 186.6 C | 321.6 BC | 5.2 A |
| 6 | SNs/Ca | 2293.5 B | 228.2 A | 348.8 B | 3.9 C |
| 7 | SNC | 2139.3 B | 212.1 AB | 328.8 BC | 4.1 B |
| Sig. | | 0.585 | 0.763 | 0.776 | 0.474 |
| CV | | 65.9 | 19.9 | 31.2 | 28.2 |

4.2.2 Chile Piquín pH 7

Para las variables de área de raíz, longitud de raíz y altura de planta el tratamiento o compuesto órgano mineral 1 mostro un comportamiento superior en estas, seguido del tratamiento 3 el cual representa la fertilización sin el elemento Fe, así mismo, en la variable de diámetro de tallo el resultado se presento de manera invertida primero el tratamiento 3 seguido del 1 (Cuadro 8).

Cuadro 8. Comparación de medias de las variables de chile piquín a pH 7.

| Trat. | Descripción | Área de Raíz mm ² | Longitud de Raíz | Altura de Planta | Diámetro de Tallo |
|-------|------------------------------|------------------------------|------------------|------------------|-------------------|
| 1 | AF + Fe 2 mL L ⁻¹ | 2800.1 A | 257.5 A | 389.4 A | 4.8 AB |
| 2 | AF + Fe 6 mL L ⁻¹ | 1032.9 D | 196.9 C | 372.5 AB | 3.5 C |
| 3 | SNs/Fe | 2584.5 AB | 244.7 AB | 352.3 B | 5.4 A |
| 4 | AH + Ca 2 mL L ⁻¹ | 2553.3 AB | 187.8 C | 328.8 B | 4.3 B |
| 5 | AH + Ca 6 mL L ⁻¹ | 1664.1 C | 209.9 B | 306.7 C | 3.5 C |
| 6 | SNs/Ca | 1530.2 C | 172.1 C | 284.4 C | 3.7 C |
| 7 | SNC | 2139.3 B | 212.1 B | 260.6 D | 4 B |
| Sig. | | 0.246 | 0.117 | 0.434 | 0.112 |
| CV | | 60.2 | 24.8 | 31.1 | 26.8 |

4.3 Segunda Etapa Chile Jalapeño

4.3.1 Chile Jalapeño pH6

El Cuadro 9 presenta la comparación de los valores obtenidos de cada tratamiento aplicado en las diferentes variables durante la segunda etapa en chile jalapeño a pH 6, lo que nos permite describir la capacidad real de cada mezcla órgano mineral e inorgánica aplicada, por lo que el tratamiento 1 resulto en el más significativo mostrando su comportamiento superior en 5 de 10 variables evaluadas las cuales fueron: Diámetro de Tallo, Capacidad de Intercambio Catiónico Radicular, Vitamina C Primer Corte, Segundo Corte y Vitamina C Segundo Corte por encima del tratamiento 7, así mismo, el tratamiento 5 con el elemento faltante resulto sobresaliente en la variable de Longitud de Raíz, en Área de Raíz mayor a 1 mm² el tratamiento 7 trascendió en los resultados obtenidos de igual manera que el compuesto órgano mineral 4.

Cuadro 9. Comparación de medias de las variables de chile jalapeño a pH 6.

| Trat. | Descripción | Área de Raíz < 1 mm ² | Área de Raíz > 1 mm ² | Longitud de Raíz | Altura de Planta | Diámetro de Tallo |
|-------|------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|------------------|------------------|-------------------|
| 1 | AF + Fe 2 mL L ⁻¹ | 10147.9 | 3.9 | 473.5 | 622.7 | 16.3 |
| 2 | AF + Fe 6 mL L ⁻¹ | 9424.4 | 3.8 | 474.4 | 587.3 | 15.1 |
| 3 | SNs/Fe | 5757.5 | 4.1 | 317.5 | 709.2 | 10.4 |
| 4 | AH + Ca 2 mL L ⁻¹ | 13378.8 | 4.2 | 467.8 | 632.7 | 12.3 |
| 5 | AH + Ca 6 mL L ⁻¹ | 9100.3 | 3.9 | 493.9 | 596.1 | 12.8 |
| 6 | SNs/Ca | 4126.2 | 4.1 | 432.4 | 623.9 | 11.8 |
| 7 | SNC | 5186.6 | 4.9 | 328.1 | 683.4 | 11.8 |
| Sig. | | 0.187 | 0.515 | 0.084 | 0.253 | 0.357 |
| CV | | 50.7 | 56.4 | 24.5 | 9 | 16.1 |

Cuadro 9. Continuación.

| Trat. | Descripción | CICR | 1 ^{er} Corte | Vit. C 1 ^{er} Corte | 2 ^o Corte | Vit. C 2 ^o Corte |
|-------|------------------------------|-------|-----------------------|------------------------------|----------------------|-----------------------------|
| 1 | AF + Fe 2 mL L ⁻¹ | 145 | 264.4 | 74.8 | 480.7 | 73.6 |
| 2 | AF + Fe 6 mL L ⁻¹ | 112 | 255.7 | 64.8 | 458.9 | 62.6 |
| 3 | SNs/Fe | 133.8 | 265.6 | 68.2 | 478.1 | 65.6 |
| 4 | AH + Ca 2 mL L ⁻¹ | 118.2 | 253.9 | 73.2 | 460.2 | 72.2 |
| 5 | AH + Ca 6 mL L ⁻¹ | 86.8 | 251.4 | 60 | 447.5 | 58.6 |
| 6 | SNs/Ca | 92.4 | 248.8 | 59.2 | 434.4 | 57.6 |
| 7 | SNC | 91.2 | 241.8 | 59.8 | 435.1 | 57.4 |
| Sig. | | 0.667 | 0.632 | 0.932 | 0.827 | 0.846 |
| CV | | 19.6 | 3.1 | 93 | 3.8 | 10 |

CICR= Capacidad de Intercambio Catiónico Radicular

Los resultados obtenidos del diagnóstico del estado nutrimental se encuentran en el Cuadro 10, agrupados de acuerdo a cada tratamiento, los nutrimentos se encuentran en el intervalos normal de alto a bajo. Los marco como micronutrimentos produjeron índices positivos y se cuntifican de manera suficiente, sin embargo el orden común o como se reportan generalmente no es el mismo debido a que los iones fueron tomados en forma selectiva por la planta y utilizados en sus etapas fisiológica.

Cuadro 10. Desviación Oprima Porcentual del Primer Corte de Chile Jalapeño

Tratamiento pH 6 Segunda Etapa.

| Trat. | Descripción | Orden de Nutrientes |
|-------|------------------------------|----------------------|
| 1 | AF + Fe 2 mL L ⁻¹ | N>Ca>P>K>Mg>Zn>Fe>Cu |
| 2 | AF + Fe 6 mL L ⁻¹ | N>Ca>P>K>Mg>Zn>Fe>Cu |
| 4 | AH + Ca 2 mL L ⁻¹ | Ca>N>P>K>Mg>Zn>Fe>Cu |
| 5 | AH + Ca 6 mL L ⁻¹ | Ca>N>PK>Mg>Zn>Fe>Cu |
| 7 | SNC | Ca>N>P>Mg>K>Zn>Fe>Cu |
| 3 | SNs/Fe | N>Ca>P>Mg>K>Fe>Zn>Cu |
| 6 | SNs/Ca | Ca>N>P>Mg>K>Fe>Zn>Cu |

En la investigación realizada, el análisis DOP con la solución nutritiva Steiner como base nutrimental, no presenta síntomas visibles de deficiencia o negativos de cada elemento, por lo que las concentraciones obtenidas de estos en la biomasa aérea se encuentran dentro de los intervalos de buen abastecimiento (Cuadro 11).

**Cuadro 11. Desviación Oprima Porcentual del Segundo Corte de Chile Jalapeño
Tratamiento pH 6 Segunda Etapa.**

| Trat. | Descripción | Orden de Nutrientes |
|-------|------------------------------|----------------------|
| 1 | AF + Fe 2 mL L ⁻¹ | N>P>Ca>K>Mg>Zn>Fe>Cu |
| 2 | AF + Fe 6 mL L ⁻¹ | N>P>Ca>K>Mg>Zn>Cu>Fe |
| 4 | AH + Ca 2 mL L ⁻¹ | N>P>Ca>K>Mg>Cu>Zn>Fe |
| 5 | AH + Ca 6 mL L ⁻¹ | N>P>Ca>K>Mg>Zn>Cu>Fe |
| 7 | SNC | N>P>Ca>K>Mg>Cu>Zn>Fe |
| 3 | SNs/Fe | N>P>Ca>K>Mg>Cu>Zn>Fe |
| 6 | SNs/Ca | N>P>Ca>K>Mg>Cu>Zn>Fe |

Para la segunda etapa se llevo a cabo una correlación entre las diferentes variables analizadas para chile jalapeño en pH 6, en las cuales los valores sobresalientes fueron AR mm². Raíces < 1 mm-CICR 0.920 y la CICRse repite con las variables de rendimiento primer corte, vitamina C del primer corte, rendimiento segundo corte y vitamina C segundo corte, resultando en 0.856, 0.870, 0.918 y 0.839 respectivamente.

4.3.2 Chile Jalapeño pH7

En el Cuadro 12 el balance de los valores se mostró de modo irregular, en comparación con el cuadro anterior, ya que el comportamiento de los tratamientos esperado consistía en que los compuestos orgánicos mostraran su efecto superior en las variables evaluadas y los compuestos 3, 6 y 7 fueron superiores en 5 de las 10

variables evaluadas Diámetro de Tallo, Primer Corte y Segundo Corte para el tratamiento 3, Longitud de Raíz y Área de Raíz menor a 1 mm² para los compuestos 6 y 7 respectivamente, Área de Raíz mayor a 1 mm² para el tratamiento 2 y el tratamiento 1 resultó óptimo en Altura de Planta, Capacidad de Intercambio Catiónico Radicular, Vitamina C Primer y Segundo Corte.

Cuadro 12. Comparación de medias de las variables de chile piquín a pH 7.

| Trat. | Descripción | Área de Raíz < 1 | Área de Raíz > 1 | Longitud de Raíz | Altura de Planta | Diámetro de Tallo |
|-------|------------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-------------------|
| 1 | AF + Fe 2 mL L ⁻¹ | 9357.7 | 4.1 | 459.5 | 736.5 | 10.7 |
| 2 | AF + Fe 6 mL L ⁻¹ | 8820.1 | 4.1 | 454.9 | 623.7 | 12.1 |
| 3 | SNs/Fe | 7707.2 | 3.8 | 410.9 | 629.8 | 12.7 |
| 4 | AH + Ca 2 mL L ⁻¹ | 8178.6 | 3.8 | 472.2 | 719.8 | 10.7 |
| 5 | AH + Ca 6 mL L ⁻¹ | 6780.3 | 3.8 | 409.7 | 618.1 | 11.4 |
| 6 | SNs/Ca | 8978.6 | 4.1 | 489.7 | 567.1 | 10.3 |
| 7 | SNC | 11304.9 | 3.8 | 380.1 | 666.1 | 10.3 |
| Sig. | | 0.123 | 0.183 | 0.096 | 0.165 | 0.111 |
| CV | | 31.1 | 5.3 | 12.8 | 14.1 | 12.7 |

Cuadro 12. Continuación

| Trat. | Descripción | CICR | 1 ^{er} Corte | Vit. C 1 ^{er} Corte | 2 ^o Corte | Vit. C 2 ^o Corte |
|-------|------------------------------|-------|-----------------------|------------------------------|----------------------|-----------------------------|
| 1 | AF + Fe 2 mL L ⁻¹ | 137.8 | 260.6 | 70.4 | 469.6 | 68.6 |
| 2 | AF + Fe 6 mL L ⁻¹ | 108.4 | 244.9 | 62.8 | 439.9 | 62.2 |
| 3 | SNs/Fe | 126.8 | 261.7 | 68.2 | 489.8 | 67 |
| 4 | AH + Ca 2 mL L ⁻¹ | 117.2 | 250.1 | 60.6 | 445.7 | 61.2 |
| 5 | AH + Ca 6 mL L ⁻¹ | 106 | 242.5 | 54.8 | 441.1 | 54.8 |
| 6 | SNs/Ca | 88.2 | 234.9 | 55.4 | 425.3 | 55 |
| 7 | SNC | 90.8 | 242.4 | 54.6 | 420.3 | 54.8 |
| Sig. | | 0.981 | 0.830 | 0.906 | 1 | 0.766 |
| CV | | 15.4 | 3.7 | 10.1 | 5.1 | 9.3 |

CICR= Capacidad de Intercambio Catiónico Radicular

Muchos autores utilizan en sus estudios la suma de los valores absolutos de DOP, la cual es utilizada como un indicador del grado de acercamiento de una muestra a la situación nutrimental optima, lo cual nos permitió de nuestra muestra (Cuadro 7) fijar valores para corregir los elementos en la siguiente fertilización.

**Cuadro 13. Desviación Oprima Porcentual del Primer Corte de Chile Jalapeño
Tratamiento pH 7 Segunda Etapa.**

| Trat. | Descripción | Orden de Nutrientes |
|-------|------------------------------|----------------------|
| 1 | AF + Fe 2 mL L ⁻¹ | Ca>N>P>Mg>K>Zn>Fe>Cu |
| 2 | AF + Fe 6 mL L ⁻¹ | Ca>N>P>Mg>K>Zn>Fe>Cu |
| 4 | AH + Ca 2 mL L ⁻¹ | Ca>N>P>Mg>K>Zn>Fe>Cu |
| 5 | AH + Ca 6 mL L ⁻¹ | Ca>N>P>Mg>K>Zn>Fe>Cu |
| 7 | SNC | Ca>N>P>Mg>K>Zn>Fe>Cu |
| 3 | SNs/Fe | Ca>N>P>Mg>K>Zn>Fe>Cu |
| 6 | SNs/Ca | Ca>N>P>Mg>K>Zn>Fe>Cu |

Efectivamente el índice DOP nos permite interpretar el análisis foliar tomado, los rangos se muestran por encima de los límites de suficiencia, lo cual indica que los nutrimentos fueron tomados por la planta por orden a sus necesidades (Cuadro 13).

**Cuadro 14. Desviación Oprima Porcentual del Segundo Corte de Chile Jalapeño
Tratamiento pH 7 Segunda Etapa.**

| Trat. | Descripción | Orden de Nutrientes |
|-------|------------------------------|----------------------|
| 1 | AF + Fe 2 mL L ⁻¹ | N>P>Ca>K>Mg>Zn>Cu>Fe |
| 2 | AF + Fe 6 mL L ⁻¹ | N>P>Ca>K>Mg>Zn>Cu>Fe |
| 4 | AH + Ca 2 mL L ⁻¹ | N>P>Ca>K>Mg>Cu>Zn>Fe |
| 5 | AH + Ca 6 mL L ⁻¹ | N>P>Ca>K>Mg>Zn>Cu>Fe |
| 7 | SNC | N>P>Ca>K>Mg>Cu>Zn>Fe |
| 3 | SNs/Fe | N>P>Ca>K>Mg>Cu>Zn>Fe |
| 6 | SNs/Ca | N>P>Ca>K>Mg>Cu>Zn>Fe |

De manera similar se realizó una correlación para las diferentes variables analizadas de Chile Jalapeño en pH 7, en las cuales los valores sobresalientes fueron AR mm². Raíces < 1 mm-CICR 0.974, en este pH se observó el mismo comportamiento que del pH 6, donde la CICR se repite con las variables pero valores mayores, en rendimiento primer corte con un 0.930, vitamina C del primer corte 0.899, rendimiento segundo corte 0.877 y vitamina C segundo corte 0.893.

Las variables de los tratamientos a pH 6 evaluados en la primera etapa, correspondientes a Chile Piquín, mostraron una similitud en cuanto al compuesto orgánico-mineral que fue aplicado, para AR, AP y DT el humato de calcio a razón de 2 mL L⁻¹ fue sobresaliente en las variables mencionadas y el AF + Fe 2 mL L⁻¹ se mostró superior en AR. De igual manera se evaluaron los mismos tratamientos pero en un pH

de 7, lo cual resulto en que el componente fulvato de hierro o $AF + Fe\ 2\ mL\ L^{-1}$ mostrara un óptimo comportamiento en las variables AR, LR, AP y DT. De manera afín para chile jalapeño, los tratamientos evaluados a pH 6 resultaron en una similitud para las variables de AR, LR y AP con el uso de $AF + Fe\ 2\ mL\ L^{-1}$ y para DT el $AH + Ca\ 2\ mL\ L^{-1}$ se presenta como el mejor tratamiento. Estos mismos tratamientos fueron ajustados a pH 7 los que reflejaron un comportamiento similar en las variables de LR, AP y DT con el uso del compuesto húmico mineral $AH + Ca\ 2\ mL\ L^{-1}$ y para la AR el tratamiento mineral con el elemento faltante SNs/Ca fue el recomendable.

En la segunda etapa del experimento para chile jalapeño, los tratamientos y variables fueron manejados similares con los niveles de pH 6 y 7; obteniendo para AR Raíces < 1 mm los tratamientos sobresalientes $AH + Ca\ 2\ mL\ L^{-1}$ y SNs/Ca en pH 6 y 7 respectivamente, en pH 6 el AR Raíces > 1 mm la SNs/Ca y pH 7 el $AF + Fe\ 6\ mL\ L^{-1}$ resultaron sobresalientes, para las variables LR, AP y DT el añadir la SNC, $AH + Ca\ 2\ mL\ L^{-1}$ y $AF + Fe\ 2\ y\ 6\ mL\ L^{-1}$ mostraron significancia en los resultados, en las mismas variables pero a un nivel de pH 6 los componentes órgano-minerales $AH + Ca\ 6\ mL\ L^{-1}$, $AH + Ca\ 2\ mL\ L^{-1}$ y $AH + Ca\ 2\ mL\ L^{-1}$ reflejaron su óptimo comportamiento en los resultados obtenidos, para la CICR en ambos pH el comportamiento fue similar ya que los compuestos de $AF + Fe\ 2\ mL\ L^{-1}$ y $AH + Ca\ 2\ mL\ L^{-1}$ reflejaron ser las dosis optimas para esta variable, el comportamiento del tratamiento $AH + Ca\ 2\ mL\ L^{-1}$ en rendimiento del primer corte fue el superior en pH 6 y 7 como lo fue la dosis de $AF + Fe\ 2\ mL\ L^{-1}$ en los dos niveles de pH para la variable de vitamina C, en el rendimiento del segundo corte el $AF + Fe\ 2\ mL\ L^{-1}$ y $AH + Ca\ 2\ mL\ L^{-1}$ fueron los componentes sobresaliente

con pH 6 y 7 y para vitamina C en los mismos niveles de pH se repitió la dosis de AF + Fe 2 mL L⁻¹.

La configuración espacial del sistema de raíces como número y la longitud de los órganos laterales, se llama arquitectura radicular, variará en gran medida dependiendo de las especies de plantas, la composición del suelo y en particular sobre el agua, minerales y la disponibilidad de nutrientes, las plantas pueden optimizar su arquitectura radicular mediante el inicio de los primordios de raíces laterales que influyen en el crecimiento de las raíces primarias o laterales; los resultados del sistema raíz son el control coordinado de factores genéticos endógenos como la regulación crecimiento y organogénesis y la acción de estímulos ambientales abiótico y bióticos (Malamy, 2005). Las diferentes etapas de desarrollo de la raíz es controlado y regulado por diferentes fitohormonas, sin embargo las auxinas juega un rol principal (Leyser, 2006).

El DOP es considerado un método estático, usa una comparación de la concentración del nutriente respecto a una norma, pero una expresión porcentual (Montañés *et al*, 1991 y 1993. En otras palabras, hace una cuantificación de la cantidad que un dato se diferencia de la norma. Esto permite una clasificación de los nutrientes en el orden de su efecto limitante. De esta forma el sumatorio de los valores absolutos de los índices representa el balance nutricional completo de la planta debido al momento del muestreo y a las relaciones entre los nutrientes. Esto concuerda con Guerra y Bautista (2002), mencionan que el contenido del elemento puede ser bajo o menos constante ya que esto depende de las variaciones de la planta a través del tiempo.

Considerando que la demanda nutrimental de cada cultivo se basa en la capacidad para absorber nutrientes necesarios para obtener un rendimiento máximo posible el cual se contabiliza a partir de la concentración en la biomasa de los productos cosechados, las hortalizas absorben grandes cantidades de nutrientes, mismos que dependen de la calidad de estos, influenciados por variables genéticas y ambientales (Grageda, 1999).

El suelo es un medio complejo con alta resolución espacial y la variabilidad ambiental-temporal en una amplia gama de escalas, incluyendo las que se refieren a las raíces de las plantas. El sistema de raíces, con su desarrollo extenso pero estructurado, puede ser considerado como un proceso evolutivo respuesta a dicha variabilidad espacio-temporal en los recursos de suministro y las limitaciones asociadas sobre el crecimiento (Harper *et al.*, 1991). Como consecuencia de ello, la extensión en el espacio y el tiempo del sistema radicular se rige por reglas genéticas impulsando el desarrollo que son moduladas por las condiciones ambientales, la morfología de la raíz es en la mayoría de los casos regulados por una suite de pequeños efectos loci que interactúan con el entorno (de Dorlodot *et al.*, 2007).

La arquitectura de un sistema radicular es el resultado de los procesos de desarrollo y es un concepto dinámico. La arquitectura radicular aborda dos conceptos importantes: La forma del sistema de raíces y de su estructura: la forma define la ubicación de las raíces en el espacio y la forma en que el sistema de raíces ocupa el suelo, su cuantificación se logra generalmente mediante la medición de variables como la profundidad, expansión de las raíces laterales y la raíz densidad de tallas. En contraste, la estructura de la raíz describe la variedad de los componentes que constituyen el

sistema (raíces y segmentos) y su relación (por ejemplo, la topología: conexión entre las raíces; gradientes raíz). Si bien, la diferenciación raíz tiene impactos importantes sobre las relaciones estructura-función (Clarkson 1996).

La rizósfera, es decir, el volumen de suelo alrededor raíces de las plantas que se ve influenciada por la actividad de la raíz viva (Hinsinger *et al.*, 2005), es a menudo simplemente considerado como una forma cilíndrica alrededor de la raíz. Sin embargo, esta simplificación no tiene en cuenta la integración a nivel de sistema de la raíz o de la complejidad inherente de los sistemas de raíces que surgen de la geometría, dinámica temporal y los aspectos heterogéneos de raíces. Estas complejidades se incorporan en el concepto de la arquitectura de la raíz. La geometría de la raíz es compleja debido al movimiento específico en el espacio de cada raíz, las posiciones relativas entre las raíces y la posible superposición de sus zonas de influencia. La dinámica temporal viene tanto del crecimiento de los diferentes ejes de raíz y de los procesos fisiológicos asociados con los segmentos de raíz (es decir, la diferenciación de tejidos) resultantes de la variabilidad temporal y espacial de la función a lo largo de los ejes de raíz. La diversidad entre las raíces del sistema radicular y la heterogeneidad del suelo aumenta aún más esta variabilidad.

Durante mucho tiempo se ha reconocido que la en la morfología *in situ* de un sistema de raíces puede ser complejo y puede variar en gran medida, incluso dentro de una especie (Cannon 1949; Kutschera 1960), lo que refleja la interacción entre los procesos de desarrollo y las limitaciones ambientales. Esta clasificación también refleja diferencias entre especies monocotiledóneas y dicotiledóneas: el sistema radicular dicotiledónal se deriva de las raíces primarias y ramificación lateral (sistema de la raíz

primaria), con raíces que pueden presentar un crecimiento radial. Dependiendo de la extensión de laterales con relación al eje principal, la morfología del sistema de raíces variará entre arraigadas y difusa o fasciculada.

La diversidad de la función de raíz se ilustra por el agua y la absorción de nutrimentos, si todas las raíces se comportaran de forma idéntica, las tasas medidas *ex-situ* de captación se basarían en la longitud resultando en un gran sub estimación de las tasas de absorción (Robinson, 1991). En contraste, las tasas de absorción medidos reales sugieren que sólo el 10% al 30% de la longitud total del sistema de la raíz está involucrado en la absorción de agua o y nutrimentos, respectivamente. Esto plantea la cuestión de qué partes del sistema de la raíz están activos y varía con la disponibilidad de nutrientes, la respuesta se basa en la evaluación de la heterogeneidad de funcionamiento raíz *in situ*. Esta diversidad anatómica, fisiológica y morfológica se ha llamado "heterorhizy" (heterogeneidad radicular) (Hishi, 2007). Las variaciones en la morfología o función pueden ocurrir entre las raíces de diferente origen (ontogénesis) o a lo largo de la raíz (diferenciación).

Morfológicamente, las grandes diferencias entre las raíces se producen debido al diámetro de la raíz: por ejemplo, en la monocotiledóneas, *Musa acuminata* (árbol de plátano) las variaciones de diámetro de la raíz puede llegar a 2 órdenes de magnitud, es decir, 0.06 a 6 mm, tales variaciones son comunes en muchas especies, aunque por lo general en órdenes de magnitud inferiores a 1cm y están vinculados a la variación en la estructura de la raíz (Fitter 2002)

Grandes cambios en las propiedades fisiológicas también se producen a lo largo de las raíces como resultado de envejecimiento de los tejidos y la diferenciación. En

consecuencia, la variación en función de la raíz como los porcentajes de absorción de nutrientes se observan en el aumento de la distancia de la punta de la raíz (Clarkson, 1996)

Estos incluyen los gradientes en:

- respiración: la alta variación de la respiración se encuentra en las proximidades del ápice y también hasta 20 cm de la punta de la raíz (Bidel., 2000).
- la absorción de iones: NO_3 y NH_4 captación P, K y Ca la absorción y translocación, varía a lo largo de raíces con diferentes zonas activas (principalmente apical) y la absorción pasiva (Clarkson 1996).
- excreción de protones / hidroxilo: partes de raíces puede excretar H^+ , mientras que otra liberación OH^- en función de la fuente de N (Jaillard *et al.*, 2000);
- exudación de carbono, que se concentra principalmente en la zona apical (Personeni *et al.*, 2007).
- propiedades de transporte de agua de raíz axial y radial que está vinculada a la maduración del tejido, el crecimiento radial en las raíces de dicotiledóneas también da como resultado un aumento drástico de la raíz de la conductancia axial.

La medición de la superficie radicular, ha demostrado que es un buen predictor de la captura de nutrimentos (Hodge *et al.*, 2000), sin embargo, el contexto en el que se produce la respuesta de proliferación también es necesario que sea considerado.

Las raíces son sujetas a la impedancia mecánica cuando la fuerza necesaria para desplazar las partículas del suelo como la raíz aumenta. Como resultado, el diámetro de la raíz aumenta, la punta de la raíz y la elongación radicular disminuye con

el aumento de la resistencia del suelo. Materechera *et al.* (1991) informaron que las dicotiledóneas (con grandes diámetros) en suelos fuertes penetran más que las monocotiledóneas (con diámetros más pequeños), esto sugiere que las especies dicotiledóneas ejercen mayores presiones del crecimiento axial.

Las raíces pequeñas (de < 2 mm de diámetro) tienen una función importante en la absorción de agua y nutrientes del suelo. Rotación de raíces finas, incluyendo la producción de raíces finas y la mortalidad, va a costar una gran cantidad de hidratos de carbono, y mientras tanto, devolver nutrientes importantes para el suelo (Zhang *et al.*, 2000). Por lo tanto, el volumen de raíces finas desempeña un papel importante en el ciclo de carbono (C) y absorción de nutrimentos (Gill y Jackson, 2000). Sin embargo, todavía no está claro cómo la disponibilidad de nutrimentos del suelo influye en el proceso de la producción de raíces finas y la mortalidad (Schenk y Jackson, 2002), por lo tanto, la producción de raíces finas y la mortalidad también muestran importantes variaciones estacionales y es poco conocido, las raíces pequeñas (< 1 mm de diámetro) suelen mostrar debilidad lignificación, el mantenimiento de sus funciones de absorción de nutrientes y agua, así como el consumo de hidratos de carbono (Eissenstat y Yanai, 1997).

Los valores de rendimiento, vitamina C y adsorción de nutrimentos concuerdan con los valores generados por Azofeifa 2005 respectivamente.

La CICR coincide con los datos expresados por Crooke, 1964, Ray y George, 2011, en los cuales indican que una CICR elevado la suberización en la raíz es mínima y la capacidad de intercambio catiónico se ve beneficiado en la absorción de nutrimentos, los cuales en el DOP se mostraron de manera suficiente. Así mismo

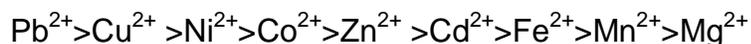
hacen referencia que la CICR resulta en correlaciones del 0.87 son positivas y muestran su efecto en variables como rendimiento

La capacidad de las sustancias húmicas para formar complejos con cationes depende de su contenido de grupos funcionales donantes de electrones (Stevenson, 1994). Cualquiera de los enlaces débiles como puentes de agua, atracción electrostática debido a la capacidad de intercambio catiónico, o fuertes lazos que involucran coordinación con los grupos individuales o de formación de estructuras en anillos (quelatos) con grupos carboxilo, alcohol, amino y por lo tanto se pueden formar diferentes tipos de enlaces dependiendo del grado de estos las uniones más débiles juegan un papel más importante a la hora de saturarse se hacen más fuertes.

La formación de un enlace entre el metal y la molécula orgánica, generalmente resulta en una mayor estabilidad del complejo.

La estabilidad del complejo quelato de metal depende del número de átomos que forma un enlace con el ion metálico, el número de anillos que se forman, la naturaleza y la concentración del ion metálico, y el pH (Stevenson, 1994).

Para la estabilidad de los complejos formados entre metales y ácidos húmicos se ha determinado a través de la valoración potenciométrica y las series de Irving-Williams:



Por otro lado, a un valor pH de 5.0 no había grandes diferencias en la fuerza de los enlaces entre los ácidos húmicos y metales tales como Ca, Mg, Mn, Co, Ni y Zn, mientras que Pb, Cu y Fe fueron más fuertemente atado (Schnitzer y Kahn, 1972); este comportamiento indica que a valores de pH diferentes, complejos metal-húmicos de sustancias de diferente estabilidad están formados en el suelo, debido la fuerza de los

enlaces entre los ácidos húmicos y metales tales como Ca, Mg, Mn, Co, Ni y Zn, mientras que Pb, Cu y Fe fueron más fuertemente atado (Schnitzer y Kahn, 1972). Debido a la heterogeneidad de las sustancias húmicas sobre el peso molecular, el contenido de grupos funcionales, variedad de sitios de enlace y cambios en la conformación de estas macromoléculas con pH y concentración de sal, es difícil llegar a un estado inequívoco de conocimiento (Chen y Stevenson, 1986).

Se han hecho intentos para determinar las constantes de estabilidad aparente (K_{app}) de Fe^{3+} con dos fracciones hidrófobas de la materia orgánica disuelta obtenidos de un compost de estiércol, después de sorción XAD-8 sobre resina (Chen *et al.*, 2004). Los valores de K_{app} a pH 5.0 y una fuerza iónica de 0.1 M eran 7.91 para la fracción desorbida con NaOH y 6.76 para que desorbe con metanol. García-Mina *et al.* (2004) investigaron la estabilidad de los diferentes complejos de metal-húmicos (NaOH extrajo) en el intervalo de pH 6-9 y fuerza iónica de 3 mM, y encontraron valores máximos K_{app} (4.11) a pH 8.0. Estos valores son ligeramente menores que la máxima estabilidad valores constantes determinada por complejos entre Fe y agentes quelantes sintéticos (por ejemplo, EDTA, EDDHA) o compuestos orgánicos de origen biológico (por ejemplo, ácidos orgánicos, sideróforos, fitosideróforos) (Ryan *et al.*, 2001). Sin embargo, se debe tener en cuenta que para los compuestos como EDTA, citrato y oxalato la capacidad de mantener Fe en solución por encima de pH 6.0 es muy limitada. Además, la estabilidad de los niveles elevados de ácidos orgánicos o (fito) sideróforos en suelos es poco probable, debido a su rápida descomposición microbiana. En este contexto, la contribución de las sustancias húmicas a la disponibilidad de Fe es concebible significativo, basado en la cantidad de moléculas

presentes en la solución del suelo y el suelo, la alta resistencia a la degradación microbiana, y la estabilidad relativamente alta constante a valores de pH se encuentran típicamente en alcalina y los suelos calcáreos.

Las sustancias húmicas son conocidos por ser reactivo redox y capaz de reducir químicamente los metales incluyendo Fe^{3+} (Struyk y Sposito, 2001).

La evidencia sugiere que la complejación del metal con inorgánico y/o ligandos orgánicos en el suelo puede tener dramática influencia sobre la movilidad y la biodisponibilidad de los metales a organismos del suelo y las plantas. El grado de metal-ion de retención por la arcilla se ha demostrado que variar con los parámetros de la isoterma de adsorción (soluto concentración de cationes en competencia, la unión constante) y con otros factores tales como el pH y el tipo de arcilla mineral, por ejemplo, tipo de ligando. Fuerte dependencia de adsorción del metal en pH fue observado por Benjamin y Leckie (1981) y Forbes *et al.* (1976). Kuo y Baker (1980) encontraron que Cu^{2+} y Cd^{2+} adsorción por tres suelos ácidos aumentado pH aumentó por encima del punto de carga cero (ZPC).

La respuesta altamente positiva de las plantas y los suelos de la aplicación de SH en experimentos de laboratorio han despertado un gran interés en la producción de fertilizantes húmicos comerciales de todo el mundo. La experiencia con el uso de fertilizantes húmicos en agricultura y horticultura permitido a muchas empresas a producir humatos comerciales de diversos materiales orgánicos crudos, en su mayoría, de turba, leonardita, y otro tipo de lignitos. Además de nutrientes, acondicionadores de varios o de los regímenes especiales de la producción dio lugar a una gran variedad de humatos destinados a diferentes tareas: la fertilización,

recuperación de suelos degradados, sorción de sustancias tóxicas, y estimuladores del crecimiento de plantas (Ulanov, 1993).

En el campo numerosos experimentos con diferentes plantas de ensayo y especies de cultivos, se demostró que humatos comerciales de sodio, potasio y amonio, independientemente de las fuentes de materia prima para su producción, cuando se aplica en las tasas óptimas ($50-100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ o $10-100 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$), estimulan significativamente la germinación de semillas y plantas agrícolas, el aumento de absorción de agua y la respiración (Noble *et al.*, 1995), la longitud y la biomasa de tallos y raíces de determinadas variedades y disminuir la absorción de metales pesados y radionucleidos de las plantas. Este efecto es especialmente notable en la fase primaria de desarrollo de la planta, pero a veces puede ser realizado durante la ontogénesis de toda la planta, incluyendo el rendimiento (Lozanovskaya *et al.*, 1991).

La alimentación de las plantas es considerado bajo dos puntos de vista: el cualitativo (reflejado en su equilibrio) y el cuantitativo (reflejado en el contenido de los diferentes nutrimentos). El análisis foliar, constituye el instrumento más utilizado para conocer la situación nutrimental de un determinado cultivo en un determinado momento de su ciclo.

Sin embargo para la correcta interpretación de los datos analíticos y disponer de la oportuna información sobre ambos aspectos, es preciso recurrir a varios de los conceptos normalmente manejados por los especialistas: porcentaje de materia seca, nivel crítico, rangos de suficiencia, relaciones binarias, etc. Con la aplicación conjunta de varios de estos conceptos se dispondrá de un completo conocimiento de la panorámica nutritiva de la planta analizada. El diagnóstico exacto y su información

pueden resultar difíciles y complicados. Otra alternativa para la diagnosis nos la ofrecen procedimientos más complejos en los que merece destacarse por su amplia difusión el sistema DRIS (Diagnosis and Recommendation Integrated System) descrito por Beaufileis (1973) y el DOP (Desviación del Optimo Porcentual) propuesto por Montañez *et al*, (1991), estos índices permiten un conocimiento real de la situación nutrimental en sus dos aspectos.

V. CONCLUSIONES

En cuanto a los resultados obtenidos se puede concluir que la producción de raíces finas fue afectada por la influencia integradora de los complejos orgánicos, nutrimentos disponibles en el suelo y etapa fisiológica de la planta.

Se puede establecer que en el rango de tratamientos a pH 6 el ácido fúlvico enriquecido con Hierro a razón de 2 mL L^{-1} fue superior en variables de importancia como rendimiento, vitamina C y DOP.

En cuanto a los resultados obtenidos en los tratamientos con pH 7 la mezcla órgano mineral AH + Ca 2 mL L^{-1} se obtuvieron resultados favorables en vitamina C en los dos cortes y asimilación de nutrimentos en DOP.

Se puede observar que al adicionar los AF en ambos pH presentan gran cantidad de oxhidrilos (OH^-), que podrían haber formado una capa de cargas negativas alrededor de la raíz formando “puentes” con los cationes y así, se pueden fijar a las membranas celulares y las raíces adquieren un potencial negativo y por ende aumenta la absorción de cationes.

En general se observó que el uso del AF aumenta el rendimiento, vitamina C y asimilación de nutrimentos, donde el aumento de estas variables está relacionado con la etapa de aplicación y dosis.

VI. LITERATURA CITADA

- Andren, O., Elmquist, H., Hansson, A .C. 1996. Recording processing and analysis of grass root images from a rhizotron. *Plant Soil* 185(2), 259–264.
- Atiyeh, R. M., Lee, C. A., Edwards, C. A., Arancon, N. Q. and Metzger, J. D. 2002. The influence of humic acids derived from earthworm-processed organic wastes on plant growth. *Bioresour Technol* 84:7–14.
- Azofeifa A., Moreira M. 2005. Análisis del crecimiento del chile jalapeño (*Capsicum annum* L. cv. Hot), en Alajuela, Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 28(1):57-67.
- Barber, S. A. 1995. Soil Nutrient Bioavailability. A Mechanistic Approach. John Wiley & Sons, New York, NY. 414 pp.
- Basu, P., Pal, A., Lynch, J. P., Brown, K. M. 2007. A novel image analysis technique for kinematic study of growth and curvature. *Plant Physiol* 145:305–316. doi:10.1104/pp.107.103226.
- Beaufils, E.R. 1957. Research for Rational Exploitation of Hevea Using a Physiological Diagnosis Based on the Mineral Analysis of Various Parts of the Plants. *Fertilite.*, **3**: 27-38.
- Beaufils, E.R. 1973. Diagnosis and Recommendation Integrated System (DRIS). *Soil Science Bull.* No. 1, University of Natal, S. Africa.

- Bengough, A. G., Gordon, D. C., Al-Menaie, H., Ellis, R. P., Allan, D., Keith, R. 2004. Gel observation chamber for rapid screening of root traits in cereal seedlings. *Plant Soil* 262:63–70. doi:10.1023/B:PLSO.0000037029.82618.27.
- Benjamin, M. M. and Leckie, J. O. 1981. Multiple site adsorption of Cd, Cu, Zn, and Pb on amorphous iron oxyhydroxide. *J. Colloid Interface Sci.* 79, 209–221.
- Bidel, L., Renault, P., Pagès, L., Rivière, L. M. 2000. An improved method to measure spatial variation in root respiration: application to the taproot of a young peach tree *Prunus persica*. *Agronomie* 21:179–192 doi:10.1051/agro:2001116.
- Bouma, T. J., Broekhuysen, A. G. M. and Veen, B. W. 1996. Analysis of root respiration of *Solanum tuberosum* as related to growth, ion uptake and maintenance of biomass. *Plant Physiol. Bioch.* 34, 759–806.
- Canellas, L. P., Teixeira-Junior, L. R. L., Dobbss, L. B., Silva, C. A., Médici, L. O., Zandonadi, D. B. and Façanha, A. R. 2008. Humic acids crossinteractions with root and organic acids. *Ann Appl Biol* 153:157–166.
- Canellas, L. P., Zandonadi, D. B., Médici, L. O., Peres, L. E. P., Olivares, F. L. and Façanha, A. R. 2005. Bioatividade de substâncias húmicas – ação sobre o desenvolvimento e metabolismo das plantas. In: Canellas, L. P., G. A. Santos. (eds) *Humosfera: tratado preliminar sobre a química das substâncias húmicas*. Campos dos Goytacazes, Rio de Janeiro, pp 238–239.
- Cannon, W. A. 1949. A tentative classification of root systems. *Ecology* 30:452–458 doi:10.2307/1932458.

- Chen, Y. and Aviad, T. 1990. Effects of humic substances on plant growth, in P. MacCarthy, C.E. Clapp, R.L. Malcolm, and P.R. Bloom (eds.), *Humic Substances in Soil and Crop Sciences: Selected Reading*, Soil Sci. Soc. Am., Madison, WI, pp. 161-186.
- Chen, Y. and Stevenson, F. J. 1986. Soil organic matter interactions with trace elements, In Y. Chen and Y. Avnimelech (eds.), *The Role of Organic Matter in Modern Agriculture*, Martinus Nijhof, Dordrecht, The Netherlands, pp. 73-116.
- Chen, Y., De Nobili, M. and Aviad, T. 2004. Stimulatory effects of humic substances on plant growth, In F. Magdoff and R. R. Weil. (eds.), *Soil Organic Matter in Sustainable Agriculture*, CRC Press, Boca Raton, Florida, USA, pp. 103-129.
- Cheng, W., Coleman, D. C. and Box, Jr. J. E. 1991. Measuring root turnover using the minirhizotron technique. *Agric. Ecosyst. Environ.* 34, 261–267.
- Chukov, S. N. (2001) *Structural and Functional Parameters of Soil Organic Matter under the Conditions of Anthropogenic Impact*, St. Petersburg University Publishing House, St Petersburg.
- Clarkson, D. T. 1996. Root structure and sites of ion uptake. In: Waisel Y, Eshel A, Kafkafi U (eds) *Plant roots: the hidden half*. Marcel Dekker Pub, New York, pp 483–510.
- Crooke, W. M. 1964. The measurement of the cation exchange capacity of plant roots. *Plant and Soil* 21, 43-49.

- De Dorlodot, S., Forster, B., Pagès, L., Price, A., Tuberosa, R., Draye, X. 2007. Root system architecture: opportunities and constraints for genetic improvement of crops. *Trends Plant Sci* 12:474–481 doi:10.1016/j.tplants.2007.08.012.
- Dowdy, R. H., Nater, E. A. and Dolan, M. S. 1995. Quantification of the length and diameter of root segments with public domain software. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 26 (3–4), 459–468.
- Dowdy, R. H., Smucker, A. J. M., Dolan, M. S. and Ferguson, J. C. 1998. Automated image analyses for separating plant roots from soil debris elutriated from soil cores. *Plant Soil* 200, 91–94.
- Eissenstat, D. M., Yanai, R. D. 1997. The ecology of root lifespan. *Advances in Ecological Research*, 27: 1–60.
- Elgabaly, M. M. and L, Wiklander. 1949. Donnan equilibria in plant nutrition, I and II. *Ann. Roy. Agr. Coll. Sweden* 16, 328-338 .
- Evangelou, M., Hactice, W. H. and Andreas, D. S. 2004. The Influence of Humic Acids on the Phytoextraction of Cadmium from Soil. *Chemosphere.* 57 207—213.
- Ewing, R. P. and Kaspar, T. C. 1995. Accurate perimeter and length measurement using an edge chord algorithm. *J. Comput. Assist. Microsc.* 7, 91–100.
- Façanha, A. R., Façanha, A. L. O., Olivares, F. L., Guridi, F., Santos, G. A., Velloso, A. C. X., Rumjanek, V. M., Brasil, F., Schripsema, J., Braz-Wilho, R., Oliveira, M. A. and Canellas, L. P. 2002. Bioatividade de ácidos húmicos: efeito sobre o desenvolvimento radicular e sobre a bomba de protons.

- Forster, B. P., Thomas, W. T. B., Chloupek, O. 2005. Genetic controls of barley root systems and their associations with plant performance. *Asp Appl Biol* 73:199–204.
- Forbes, E. A., Posner, A. M. and Quirk, J. P. 1976. The specific adsorption of divalent Cd, Co, Cu, Pb, and Zn on goethite. *J. Soil Sci.* 27, 154–166.
- Fitter, A. 2002. Characteristics and functions of roots systems. In: Waisel Y, Eshel A, Kafkafi U (eds) *Plant roots: the hidden half*. Marcel Dekker Pub, New York, pp 15–32.
- Freeman, H. 1970. Boundary encoding and processing. *In* *Picture Processing and Psychopictorics*. Eds. B S Lipkin and A Rosenfeld. Academic Press, New York. pp. 241–266.
- Fründ, R., K. K. Guggenberg, H., Haider, I., Knicker, H. D., Kögel-Knaber, J., Lüdeman, W., Luster. And M. P. Spiteller. 1994. Recent advances in the spectroscopic characterization of soil humic substances and their ecological relevance. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk*, 157: 175-186.
- García-Mina, J. M., Antolín, M. C. and Sánchez-Díaz, M. 2004. Metal-humic complexes and plant micronutrient uptake: a study based on different plant species cultivated in diverse soil types, *Plant Soil* 258, 57-68.
- Gill, R. A., Jackson, R. B. 2000. Global patterns of root turnover for terrestrial ecosystems. *New phytologist*, 147: 13–31.
- Gregory, P. J. 2006. *Plant roots: growth, activity and interaction with soils*. Blackwell, Oxford, p 318.

- Gorovaya, A. I., Orlov, D. S. and Scherbenko, O. V, 1995. Humic Substances, Naukova Dumka, Kiev.
- Harper, J. L., Jones, M., Hamilton, N. R. 1991. The evolution of roots and the problem of analysing their behaviour. In: Atkinson D (ed) Plant root growth: an ecological perspective. Blackwell Scientific Publications, Oxford, pp 3–24.
- Hayes, M. H. B., P. MacCarthy., R. L. Malcolm., and R. S. Swift. 1989. The search for structure: setting the scene. In Humic Substances II: In Search of Structure; EdsWiley New York, pp 3–31.
- Hinsinger. P., Gobran, G. R., Gregory, P. J., Wenzel, W. W. 2005. Rhizosphere geometry and heterogeneity arising from root-mediated physical and chemical processes. *New Phytol* 168:293–303 doi:10.1111/j.1469-8137.2005. 01512.x.
- Hishi, T., Takeda, H. 2005. Dynamics of heterorhizic root systems: protoxylem groups within the fine-root system of *Chamaecyparis obtusa*. *New Phytol* 167:509–521.
- Hishi, T. 2007. Heterogeneity of individual roots within the fine root architecture: causal links between physiological and ecosystem functions. *J For Res* 12:126–133 doi:10.1007/ s10310-006-0260-5.
- Hendrick, R. L., Pregitzer, K. S. 1992. The demography of fine roots in a northern hardwood forest. *Ecology* 73:1094–1104.
- Hendrick, R. L. and Pregitzer, K. S. 1993. Patterns of fine root mortality in two sugar maple forests. *Nature* 361, 59–61.

- Hodge, A., Stewart, J., Robinson, D., Griffiths, B. S., Fitter, A. H. 2000. Spatial and physical heterogeneity of N supply from soil does not influence N capture by two grass species. *Funct Ecol* 14:575–584 doi:10.1046/j.1365-2435.2000.t01-1-00470.x.
- Jaillard, B., Schneider, A., Mollier, A., Pellerin, S. 2000. Modélisation du prélèvement minéral par les plantes fondée sur le fonctionnement bio-physico-chimique de la rhizosphère. In: Maillard P, Bonhomme R (eds) *Fonctionnement des peuplements végétaux sous contraintes environnementales*. Coll. INRA 93:253-287.
- Materechera, S. A., Dexter, A. R., Alston, A. M. 1991. Penetration of very strong soils by seedling roots of different plant species. *Plant Soil* 135:31–41 doi:10.1007/BF00014776.
- Kimura, K., Kikuchi, S. and Yamasaki, S. I. 1999. Accurate root length measurement by image analysis. *Plant Soil* 216, 117–127.
- Kononova, M. M. 1966. *Soil Organic Matter*, Pergamon, Oxford.
- Kuo, S. and Baker, A. S. 1980. Sorption of copper, zinc, and cadmium by some acid soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44, 969–974. Lumbanraja J and Evangelou V P 1991 Acidification and liming influence on surface charge behavior of Kentucky subsoils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 55, 26–34.
- Kutschera, L. 1960. *Wurzelatlas mittleuropäischer Ackerunkräuter und Kulturpflanzen*. Verlag Pub., Franckfurt am Main.

- Leyser, O. 2006. Dynamic integration of auxin transport and signalling. *Curr Biol* 16:R424–R433 doi:10.1016/j.cub.2006.05.014.
- Liao, H., Rubio, G., Yan, X. L., Cao, A. Q., Brown, K. M., Lynch, J. P. 2001a. Effect of phosphorus availability on basal root shallowness in common bean. *Plant Soil* 232:69–79. doi:10.1023/A:1010381919003.
- Liao, H., Yan, X. L. 2001b. Genotypic variation in root morphological characteristics of common bean in relation to phosphorus efficiency. *Acta Bot Sin* 43:1161–1166.
- Lobartini, J. C. and Tan, K. H. (1992) The geochemical nature and agricultural importance of commercial humic matter, *Sci. Total Environ.* 1/3, 1-5.
- Lozanovskaya, I. N., Luganskaya, I. A., Senchukov, G. A. and Gninenko, S. V. 1991. Effectiveness of coal-humate fertilizers on irrigated chernozems of Rostov area, in E.V. Poluektov (eds.), *Remediation and Utilization of Low-Fertile Soils*, pp. 58-64.
- Lynch, J., van Beem, J. J. 1993. Growth and architecture of seedling roots of common bean genotypes. *Crop Sci* 33:1253–1257.
- Malamy, J. E. 2005. Intrinsic and environmental response pathways that regulate root system architecture. *Plant Cell Environ* 28:67–77 doi:10.1111/j.1365-3040.2005.01306.x.
- Manschadi, A. M., Christopher, J., de Voil, P., Hammer, G. L. 2006. The role of root architectural traits in adaptation of wheat to water-limited environments. *Funct Plant Biol* 33:823–837. doi:10.1071/FP06055.

- Montanez, L., Heras, L. y Sanz, M. 1991. Desviación del Optimo Porcentual (DOP): Nuevo índice para la interpretación del análisis vegetal. *An. Aula Dei*, 20 (3-4): 93-107.
- Nar, L. F. 2005. Diagnóstico del sistema productivo chile jalapeño. Promotora de Servicios Comerciales del Estado de Campeche. Consultado el 17-9-07. Disponible en <http://www.campeche.gob.mx/Campeche/Gobierno/Organismos>.
- Nardi, S., Muscolo, A., Vaccaro, S., Baiano, S., Spaccini, R. and Piccolo, A. 2007. Relationship between molecular characteristics of soil humic fractions and glycolytic pathway and Krebs cycle in maize seedlings. *Soil Biol Biochem* 39:3138–3146.
- Noble, A. D., Randall, P. J. and James, T. R. 1995. Evaluation of two coal-derived organic products in ameliorating surface and subsurface soil acidity, *Europ. J. Soil Sci.* 46, 65-75.
- Noguchi, K., Kono[^]pka, B., Satomura, T., Kaneko, S., Takahashi, M. 2007. Biomass and production of fine roots in Japanese forests. *J For Res* 12:83–95.
- Noordwijk, S Pellerin and S C van de Geijn. pp. 305–341. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, Barcelona, Hong Kong, London, Milan, Paris, Singapore, Tokyo.
- Personeni, E., Nguyen, C., Marchal, P., Pagès, L. 2007. Experimental evaluation of an efflux-influx model of C exudation by individual apical root segments. *J Exp Bot* 58:2091–2099 doi:10.1093/jxb/erm065.

- Piccolo, A., Pietramellara, G. and Mbagwu, J. S. C. 1997. Use of humic acids substances as soil conditioners to increase aggregate stability, *Geoderma* 75, 267-277.
- Pizzeghello, D., Nicolini, G. and Nardi, S. 2001. Hormone-like activity of humic substances in *Fagus sylvaticae* forests. *New Phytol* 151:647–657.
- Quaggiotti, S., Rupert, B., Pizzeghello, D., Francioso, O., Tugnoli, V. and Nardi, S. 2004. Effect of low molecular size humic substances on nitrate uptake and expression of genes involved in nitrate transport in maize (*Zea mays* L.). *J Exp Bot* 55:803–813.
- Ramírez, H., Méndez-Paredes, O., Benavides-Mendoza, A. y Amado-Ramírez, C. 2009. Influencia de prohexadiona-ca y promotores de oxidación sobre el rendimiento, capsaicina y vitamina c en chile jalapeño. *Revista Chapingo. Serie horticultura*, Vol. 15, Núm. 3, septiembre-diciembre, pp. 231-236.
- Rauthan, B. S. and Schnitzer, M. 1981. Effects of soil fulvic acid on the growth and nutrient content of cucumber (*Cucumis sativus*) plants, *Plant and Soil* 63, 491-495.
- Ray, J. C. and George, K. J. 2010. Calcium Accumulation in Grasses in Relation to their Root Cation Exchange Capacity. *Journal of Agronomy*. 9 (2):70-74.
- Ray, J. G., George, K. J. 2011. Cation exchange capacity of roots of wild grasses and the ecological implications. *T. 22, № 3–4 ISSN 1726-1112. Екологія та ноосферологія.*

- Richner, W., Liedgens, M., Bürgi, H., Soldati, A. and Stamp, P. 2000. Root image analysis and interpretation. *In* Root Methods A Handbook. Eds. A L Smit, A G Bengough, C Engels, M van
- Robinson, D. 1991. Roots and resource fluxes in plants and communities. In: Atkinson D (ed) Plant root growth: an ecological perspective. Special publication of the British ecological society n°10. Blackwell Scientific Pub., London, pp 103–130.
- Rubio, G., Liao, H., Yan, X. L., Lynch, J. P. 2003. Topsoil foraging and its role in plant competitiveness for phosphorus in common bean. *Crop Sci* 43:598–607.
- Ryan, P. R., Delhaize, E. and Jones, D. L. 2001. Function and mechanisms of organic acid exudation from plant roots, *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.* 52, 527- 560.
- Price, A. H., Steele, K. A., Moore, B. J., Lones, R. G. W. 2002. Upland rice grown in soil-filled chambers and exposed to contrasting water-deficit regimes. II. Mapping quantitative trait loci for root morphology and distribution. *Field Crops Res* 76:25–43. doi:10.1016/S0378-4290(02)00010-2.
- Phillips, D. L., Johnson, M. G., Tingey, D. T., Biggart, C., Nowak, R. S., Newsom, J. C. 2000. Minirhizotron installation in sandy, rocky soils with minimal soil disturbance. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61, 761–764.
- Sistema Nacional de Informacion e Integracion de Mercados. (SNIIM) 2006. Boletín Informativo; Producción de Chile. En línea. Consultado el 17-9-07. Disponible en <http://www.agrochiapas.gob.mx/sitio/archivos>.

- Schilling, E. B., Lockaby, B. G., Rummer, R. 1999. Belowground nutrient dynamics following three harvest intensities on the Pearl River floodplain, Mississippi. *Soil Sci Soc Am J* 63:1856–1868.
- Schenk, H. J., Jackson, R. B. 2002. The global biogeography of roots. *Ecological Monographs*, 72(3): 311–328.
- Schnitzer, M. and Kahn, S. U. 1972. *Humic Substances in the Environment*, Marcel Dekker, New York, USA.
- Schnitzer, M. 2000. Life Time Perspective on the Chemistry of Soil Organic Matter. D. L. Sparks (Ed.). *Advances in Agronomy*, Academic Press. 98: 3-58.
- Smit, A. L., Sprangers, J. F. C. M., Sablik, P. W. and Groenwold, J. 1994. Automated measurement of root length with a three-dimensional high resolution scanner and image analysis. *Plant Soil* 158, 145–149.
- Struyk, Z. and Sposito, G. 2001. Redox properties of standard humic acids, *Geoderma* 102, 329-346.
- Stevenson, F. J. 1994. *Humus Chemistry: Genesis, Composition, and Reactions*. Wiley, New York, 443 pp.
- Sutton, R. and Sposito, G. 2005. Molecular structure in soil humic substance: new view. *Environ Sci Technol* 39(23):9009–9016.
- Tennant, D. 1975. A test of a modified line intersect method of estimating root length. *J. Ecol.* 63, 995–1001.

- Ulanov, N. N. 1993 Possibilities of use of oxidized coal and humic substances in agriculture, in D.S. Orlov (eds.), *Humic Substances in Biosphere*, Nauka, Moscow, pp. 157-162.
- Upchurch, D. R. and Ritchie, J. T. 1983. Root observations using a video recording system in mini-rhizotrons. *Agron. J.* 75, 1009–1015.
- Upchurch, D. R. 1987. Conversion of minirhizotron-root intersections to root length density. *In* *Minirhizotron observation tubes: methods and applications for measuring rhizosphere dynamics*. Ed. H M Taylor. ASA Special Publication no. 50, Madison, WI, pp 51–65.
- Wahbi, A., Gregory, P. J. 1989. Genotypic differences in root and shoot growth of barley (*Hordeum vulgare*). 1. Glasshouse studies of young plants and effects of rooting medium. *Exp Agric* 25:375–387.
- Zhang, X. Q., Wu, K. H., Murach, D. 2000. A review of methods for fine-root production and turnover of trees. *Acta Ecologica Sinica*, 20(5): 875–883.
- Zeng, G., Birchfield, S. T., Wells, C. E. 2006. Detecting and measuring fine roots in minirhizotron images using matched filtering and local entropy thresholding. *Mach. Vis. Appl.* **17**(4), 265–278

COMPORTAMIENTO DE HUMATO DE HIERRO Y FULVATO DE CALCIO EN LA DISTRIBUCIÓN DE RAÍZ DEL CHILE JALAPENO

Iron Humate and Calcium Fulvate Behavior in Root Distribution of Jalapeno Pepper

Rubén López Salazar*, Rigoberto E. Vázquez Alvarado**, Emilio Olivares Sáenz***, Juan A. Vidales Contreras***, Roberto Carranza de la Rosa***, Manuel Ortega Escobar***

RESUMEN

Con el fin de determinar el comportamiento de un ácido húmico (AH) y ácido fúlvico (AF) enriquecidos con hierro y calcio, en la distribución de raíz de chile jalapeño y piquín, se establecieron un total de 70 plantas entre ambos cultivares en bolsas para vivero, las cuales contenían 1 kg de sustrato, a cada uno de los tratamientos en sus diferentes combinaciones, se realizaron tres aplicaciones de fertilizantes, al momento de trasplante, emergencia del primer par de hojas verdaderas y la formación del segundo par de hojas, con una solución nutritiva completa (SNC); de manera afín se incorporo a las plántulas de los cultivares mencionados, una solución química sin Hierro (SNs/Fe) y otra sin Calcio (SNs/Ca); así mismo se aplico la mezcla órgano mineral AF mezclado con Calcio en concentración de 2 y 6 ml l⁻¹ a pH 6 y 7 y AH mezclado con hierro a igual concentración y pH. A ambos cultivares se les midió área radicular (AR), longitud de raíz (LR), altura de planta (AP) y diámetro de tallo (DT). El AF + Ca y AH + Fe a razón de 2 ml l⁻¹ pH 7 de agua aplicada, influyeron en las variables de área radicular (AR), longitud de raíz (LR), altura de planta (AP) y diámetro de tallo (DT).

Palabras clave: *ácidos húmicos adicionados con hierro, ácidos fúlvicos adicionados con calcio, análisis de imagen.*

SUMMARY

In order to determine the behavior of humic acid (HA) and fulvic acid (FA) enriched with iron and calcium in root distribution of jalapeno pepper and piquin pepper, in these experiment were set a total of 70 plants from both cultivars in nursery bags, which contained 1 kg of peat moss substrate, each of the treatments in different combinations were performed three applications of fertilizer at transplant, emergency first pair of true leaves and formation of the second pair of leaves, with a complete nutrient solution (CNS) was incorporated similarly to seedlings of the cultivars mentioned, a chemical solution without iron (NSw/Fe) and without calcium (NSw/Ca), likewise the mixture of FA with Ca in concentration of 2 and 6 ml l⁻¹ at pH 6 and 7 and HA mixed with Fe at the same concentration and pH. Both cultivars root area (RA), root length (RL), plant height (PH) and stem diameter (SD) were measured. The FA + Ca and HA + Fe at 2 ml l⁻¹ pH 7 applied, influenced the development of root area (RA), root length (RL), plant height (AP) and stem diameter (DT).

Keywords: *humic acids added with iron, fulvic acids added with calcium, image analysis.*

*Estudiante del Doctorado en Ciencias Agrícolas. Subdirección de Estudios de Posgrado. Facultad de Agronomía. U.A.N.L.

e-mail:rlsmorris@hotmail.com

**Asesor. Profesor Investigador. Facultad de Agronomía. U.A.N.L.

***Coasesor. Profesor Investigador. Facultad de Agronomía. UANL

****Coasesor Externo. Profesor Investigador del Colegio de Posgraduados. Texcoco. EdoMéx.

INTRODUCCIÓN

México es el país del mundo con la mayor variedad genética de chile, sin embargo China es el mayor productor y en segundo lugar está México (Nar, 2005., SNIIM, 2006). El chile piquín (*Capsicum annuum L. aviculare*) es importante en la cultura Mexicana, su consumo data desde tiempos prehispánicos (Rodríguez *et al.*, 2003). El chile jalapeño (*Capsicum annuum L.*) ocupa el segundo lugar entre las hortalizas comerciales y de exportación. Un método que en los últimos 20 años ha tomado auge en México, es la aplicación de substancias húmicas (SH) las cuales son los ácidos húmicos (AH), los ácidos fúlvicos (AF) y las huminas residuales (HR), son definidas como macromoléculas orgánicas, con estructura química compleja, distinta y estable que su forma original; provienen de la degradación de residuos de plantas y animales, gracias a la actividad enzimática de microorganismos y metamorfismo de residuos orgánicos (Fründ *et al.*, 1994 y Schnitzer, 2000); constituyen la fracción de la materia orgánica

del suelo más importante por su efecto en la ecología, estructura y fertilidad del suelo, así como en el crecimiento de las plantas (Maccarthy, 2001). Estas sustancias están presentes de forma natural en los suelos o en forma de residuos orgánicos, contribuyen en los procesos físicos que intervienen directa o indirectamente con el crecimiento vegetal y la adaptabilidad al medio ambiente, mejoran la estabilidad de los agregados del suelo (Piccolo y Mbagwu, 1999), absorción de nutrimentos (Pinton *et al.*, 1999; Quaggiotti *et al.*, 2004.), y metabolismo de carbono (Nardi *et al.*, 2007). Hay una creciente evidencia que las fracciones de las SH como los AH están dotados con actividades como la auxina (Canellas *et al.*, 2002, 2008; Zandonadi *et al.*, 2007), propiedad que también caracteriza a los AF (Muscolo *et al.*, 1999). Basado en este concepto, las propiedades bioquímicas de las moléculas bioactivas forman la estructura supramolecular de las SH relacionadas con sus efectos similares a las hormonas en el desarrollo de la raíz (Canellas *et al.*, 2005). Los efectos hormonales en las plantas han sido ampliamente descritos dependiendo del origen de las SH (Govindasmy y Chandrasekaran, 1992; Pizzeghello *et al.*, 2001.), residuos orgánicos (Masciandaro *et al.*, 1999; Façanha *et al.*, 2002) y el compost de lombriz (Cacco y Dell'Agnola, 1984; Masciandaro *et al.*, 1999; Atiyeh *et al.*, 2002; Cañellas *et al.*, 2002).

Los humatos derivados de varias fuentes naturales como el carbón, turba, sedimentos, residuos orgánicos, y algunos otros componentes, son acondicionadores de suelo efectivos. El fenómeno de la influencia positiva de las SH en el crecimiento y desarrollo fue descubierto a finales del siglo XIX y más tarde apoyado en las obras clásicas de Khristeva 1970, Kononova 1966, Tjurin 1937 y Waksman 1932.

Desde 1960, donde la naturaleza de estas investigaciones se han acumulado en varios reportes (Chen *et al.*, 1990; Chukov, 2001; McCarthy *et al.*, 1990; Vaughan, 1976; Visser, 1986). Diferentes humatos, han mostrado mejorar el crecimiento y desarrollo de las plantas, aumentando la resistencia de estas a condiciones ambientales desfavorables, y actuar de manera similar a las SH naturales del suelo (Mbagwu *et al.*, 1997; Piccolo *et al.*, 1997). En campo y numerosos experimentos de laboratorio con diferentes pruebas y especies de cultivos, han demostrado que los humatos de sodio, potasio y amoníaco, sin importar la fuente de materia prima para su producción, cuando fueron aplicados en dosis 50-100 mg l⁻¹ o 10 a 100 kg ha⁻¹, estimulan significativamente la germinación de las semillas y crecimiento de las plantas (Ulanov, 1993; Van de Venter *et al.*, 1991), aumento de absorción de agua, respiración (Noble *et al.*, 1995; Rauthan *et al.*, 1981), longitud y biomasa de los brotes y las raíces. Se atribuye una mayor eficiencia estimulante a los humatos en el crecimiento de la planta en comparación a las SH en el suelo *in vivo*, más a menudo se atribuye tanto a su estructura química en particular (Lobartini *et al.*, 1992; Lozanovskaya *et al.*, 1991) o de la influencia fisiológica (Gorovaya *et al.*, 1995). Los humatos son alteración de las partidas de las materias primas iniciales en su producción debido a una serie de procesos tales como la ruptura de las interacciones órgano-minerales, hidrólisis y oxidación; sin embargo, todavía pertenecen a la clase de compuestos de SH, pero la configuración de sus moléculas se ha cambiado, lo que les permite ser activado. El número de mecanismos fisiológicos en las plantas de la influencia de las SH, tales como la mitigación del efecto de los inhibidores de la respiración, lo que acelera la síntesis de proteínas, que afectan las reacciones

metabólicas, o actuar de manera similar a sustancias de tipo hormonal (MacCarthy *et al.*, 1990; Gorovaya *et al.*, 1995). Muchos autores han reportado que las SH influyen positivamente en el crecimiento de la planta debido a su influencia indirecta sobre las propiedades del suelo, tales como un aumento de la agregación del suelo, la aireación, la permeabilidad (Rauthan y Schnitzer, 1981), y la absorción de los nutrientes del suelo (Dell' Agnola, 1986 ;Rode *et al.*, 1993), y por mejorar la distribución de iones metálicos dentro de la planta debido a la formación de quelatos (Chen *et al.*, 1990; Kononova, 1966; Lozanovskaya *et al.*, 1991).

La respuesta de las plantas y los suelos es muy positiva a la aplicación de las fracciones húmicas en experimentos de laboratorio y campo, se ha despertado un gran interés en la producción de fertilizantes húmicos en todo el mundo. La experiencia con el uso de fertilizantes húmicos en la agricultura y la horticultura ha permitido producir humatos de varias materias primas orgánicas, sobre todo, a partir de turba, leonardita, y otro tipo de lignitos (Lobartini *et al.*, 1992). Además de los nutrientes, los acondicionadores de varios regímenes especiales de la producción resultó en una gran variedad de humatos destinados a diferentes tareas: la fertilización, recuperación de suelos degradados, absorción de sustancias tóxicas, y estimuladores del crecimiento de plantas (Lobartini *et al.*, 1992; Piccolo *et al.*, 1997; Rode *et al.*, 1993; Ulanov, 1993). Carbones cafés de bajo poder calorífico, pero alto contenido de ácidos húmicos, son los más utilizados como materia prima para la producción humatos.

Lo anterior concuerda con Evangelou *et al.* (2004), donde comentan que los compuestos

húmicos, dentro de sus características, poseen una gran cantidad de grupos funcionales oxigenados, principalmente grupos carboxilos (COOH⁻), carbonilos (COO⁻) y oxhidrilos (OH⁻), por lo que tienen la particularidad de complejar y/o quelatar cationes y en la solución del suelo, llevarlos a la pared celular de la raíz; es decir, similar a agentes quelatantes y/o complejantes y de ahí, ser transportados los nutrimentos por el torrente xilemático del tallo hacia las zonas de crecimiento.

Con lo anterior se muestra que, con la adición de ácidos orgánicos aumenta la absorción de nutrimentos, también aumenta los órganos de la planta en su crecimiento (Ray y George, 2010).

El mayor o menor grado de desarrollo de la raíz condiciona la tasa de absorción de agua por la planta, lo cual a su vez afecta importantes procesos fisiológicos como la fotosíntesis, respiración, elongación celular y muchas otras actividades metabólicas (Slatyer, 1967 y Kramer, 1983). Las raíces desempeñan un papel clave en el balance global de carbono (Rasse *et al.*, 2001; Tobin *et al.*, 2007). La raíz es un factor esencial en la estabilidad de biomasa (Rubens *et al.*, 2007), sin embargo, muchos de los procesos relacionados al desarrollo de las raíces no se conocen bien (Heimann y Reichstein, 2008). Para mejorar la comprensión de los procesos de crecimiento, tenemos que aumentar el detalle del análisis. Características arquitectónicas de las raíces son importantes para la selección de cultivos y variedades que son más eficientes en la adquisición de determinados nutrimentos del suelo (Lynch y Brown, 2001; Rubio *et al.*, 2003), y en ambientes con agua limitada (Manschadi *et al.*, 2006). Así como algunas plantas producen raíces de mayor diámetro para facilitar la penetración de las zonas densas del suelo, de

modo que otras plantas producen raíces en diferentes ángulos para facilitar la exploración de los recursos del suelo que son capaces de acceder (Lungley 1973; Pagès y Aries, 1988; Lynch y van Beem, 1993). La capacidad de una planta a la posición de sus raíces en el suelo donde el agua y los nutrientes disponibles son vitales para su crecimiento y supervivencia, pero los métodos para evaluar este aspecto del crecimiento de las raíces son pocas y la plasticidad fenotípica de los sistemas de raíces en diferentes medios de cultivo se ha limitado. Cheng *et al.*, (1991) desarrolló técnicas para la evaluación de la demografía y la dinámica de la raíz sobre la base de trazado manual de las raíces en hojas transparentes. Hendrick y Pregitzer (1993), midieron la longitud de raíz mediante la aplicación de un procedimiento interactivo, dibujo raíces individuales de forma manual con un ratón de PC. Este método aumenta la precisión, pero a menudo requiere más tiempo que el conteo manual. Dado que el método ordinario de contar manualmente las raíces es tedioso, muy laboriosas y no siempre se correlaciona con la longitud de la raíz (Upchurch, 1987). Dentro de lo que se denomina proceso de imágenes, se engloban una serie de técnicas que comprenden operaciones cuyo origen es una imagen y cuyo resultado final es otra imagen. El valor del píxel en la imagen de salida puede ser función del valor que tenía en la imagen de entrada, de los valores de sus vecinos o del valor de todos los puntos de la imagen de entrada (Rosenfeld, 1979). Según González y Wintz (1977), el objetivo de estas técnicas es procesar una imagen de tal modo que la resultante sea más adecuada que la imagen original para una aplicación específica. El término "específico" es importante porque establece que el valor de la imagen resultante esté en función del problema que se trata. Así, un método que es útil para

realizar un determinado tipo de imágenes puede no serlo para otras. La digitalización directa de imágenes en el campo y la aplicación de análisis automático de imágenes pueden ser técnicas muy útiles para acelerar la investigación de raíz; es posible determinar el comportamiento de un humato de hierro y un fulvato de calcio en la distribución de raíz de chile jalapeño y piquín a través del análisis de imagen, estableciendo la efectividad de estos en la masa radicular de los cultivos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación del Área Experimental

El estudio se llevó a cabo en el vivero de planta nativa de las instalaciones de la Facultad de Agronomía de la Universidad Autónoma de Nuevo León. El clima predominante en el área es semiseco muy cálido con lluvia en verano. Las temperaturas medias oscilan entre 14.7 °C en el mes de enero y 22.3 °C en el mes de agosto. Los meses más cálidos son junio, julio y agosto, con una temperatura media mensual que oscila entre 27 y 28 °C y el mes más frío es enero, con una temperatura media menor de 15 °C, sin embargo, es común observar en el verano (junio-agosto) temperaturas máximas extremas de 44 °C y en el invierno (enero-marzo) temperaturas de -3 °C. La precipitación anual de fluctúa de 700 a 1200 mm. El máximo régimen pluvial mensual se registra en septiembre con promedio de 160 a 170 mm y el mínimo de 10 a 15 mm se presenta en marzo (SNM, 2010).

Metodología

La fertilización química se realizó de acuerdo a los lineamientos de la solución nutritiva balanceada, procedimiento Steiner; dando la siguiente relación de nutrientes, para una solución de 10 litros (Cuadro 1).

Cuadro 1. Fertilización aplicada a los tratamientos de acuerdo a la propuesta de Steiner.

| Fertilizante | Cantidad (g y/o ml.10 l ⁻¹ de agua) |
|-----------------------------------|---|
| HNO ₃ | 1.84 |
| Ca(NO ₃) ₂ | 2.90 |
| K NO ₃ | 2.78 |
| MgSO ₄ | 0.86 |
| KH ₂ PO ₄ | 0.95 |
| CuSO ₄ | 2 |
| FeSO ₄ | 2 |
| ZnSO ₄ | 1 |
| H ₃ HO ₃ | 0.2 |

A la segunda y tercer aplicación se aumento un gramo, cada uno de los siguientes fertilizantes Ca(NO₃)₂, KNO₃, MgSO₄ y KH₂PO₄, y se disminuyeron un gramo el CuSO₄ y FeSO₄, los demás continuaron aplicándose de manera similar.

Las plantas de chile se trasplantaron en bolsas de plástico negro para vivero con medidas de 15 cm de ancho con 5 cm de pliegue y 20 cm de altura, el mes de mayo los cultivos de chile jalapeño (*Capsicum annuum* L. var. M) y chile piquín (*Capsicum annuum* L. var. aviculare), las que contenían 1 kg de sustrato peat moss Canadian Sphangnum.

Se realizaron tres aplicaciones de fertilizantes, la primera al momento del trasplante, la segunda a la emergencia del primer par de hojas verdaderas, y la tercera a la formación del segundo par de hojas verdaderas.

Los riegos aplicados fueron ligeros y diarios en las mañanas de 7-8 am, de 5-15 mm de lámina para ambos cultivares, lo cual benefició a contrarrestar las altas temperaturas de 30 a 40 °C y así evitar estrés hídrico y muerte de la planta.

Lavado de Raíz

Al momento del establecimiento del cultivo de la bolsa de vivero en el mes de Agosto del 2008 se estudió la masa radicular para ambos cultivares, por el método de análisis digital mediante lavado de raíz, el cual consistió en retirar la bolsa de cada cultivar, envolviendo la raíz con sustrato en una tela de algodón (100 x 100cm) y esta se dejó reposar en un recipiente de 100 l con agua, a 1-2 cm arriba del cuello de la raíz durante 10 minutos. Una vez humedecido el suelo de la planta se retiró cuidadosamente para no dañar los pelos radiculares en un recipiente (20 l) por separado; al contar con la raíz libre de sustrato se procedió a un tercer lavado con ácido acético (vinagre comercial de manzana) para contrastar el material mineral del sustrato y la fase viva de la raíz y eliminar los residuos de sustrato presentes en la raíz. Un cuarto lavado se le practicó en otro contenedor (20 l) para eliminar los últimos residuos de vinagre y sustrato.

Captura de Imagen

Para la digitalización de raíz se utilizó una cámara Sony Alpha DSLRA350K 14.2 MP Digital SLR CCD. Se colocaron dos pliegos de papel milimétrico para usarlo como guía de medición y la raíz con mayor longitud visible, esto para tomarla de cuadro base, la cual se adhirió en la pared con cinta adhesiva sobre una superficie blanca de papel lustrina; todas las fotografías se capturaron a la misma distancia para obtener un igual número de píxeles y área del papel milimétrico, bajo la forma de una matriz rectangular de 380 x 525 mm, o 199,500 mm², con una resolución por foto de 4592 x 3056 píxeles.

Análisis de Imagen

El análisis de imagen se llevó a cabo con el programa Image Pro Plus v 6.0 (Media Cibernética Maryland, USA), el cual consistió en la obtención de la fotografía en formato JPG, el cual es el formato comprimido más popular, compatible con gran número de programas; los datos son comprimidos para eliminar información no detectable por el ojo humano. La eficiencia de la compresión es excelente pudiendo llegar a 1/20 o 1/30 del original, lo que hace que sea un formato muy aconsejable cuando se desea almacenar un gran número de imágenes en un espacio de disco limitado, o cuando deseamos transmitir esas imágenes. El sistema soporta imágenes en color real de 24 bits por píxel. Es el formato más utilizado para imágenes en Internet.

En las imágenes binarias generadas (Figura 1), esta utilizada para la interpretación de los resultados; para chile jalapeño y piquín.

- a) Área Radicular (AR).
- b) Longitud de Raíz (LR).

c) Altura de Planta (AP).

d) Longitud de Raíz (LR).

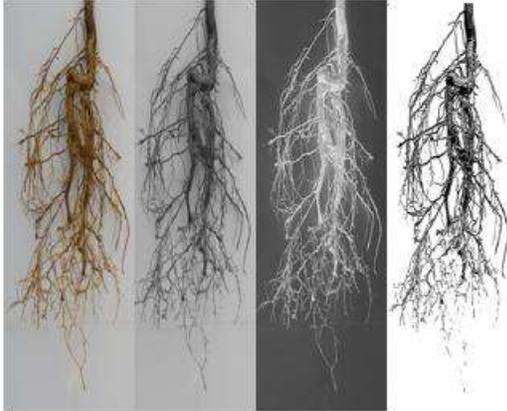


Figura 1. Proceso de imagen original a binaria en chile piquín (López, 2009).

Diseño Estadístico.

Se establecieron dos experimentos independientes uno para chile jalapeño y otro para chile piquín. Se manejaron de acuerdo a un diseño experimental completamente al azar con dos niveles de aplicación de AH y AF (2 y 6 ml l⁻¹) dos niveles de pH (6 y 7), y para la fertilización química (SNC, SNs/Fe y SNs/Ca). El reparto de los tratamientos quedo de la siguiente forma:

Cuadro 2. Distribución de tratamientos para chile jalapeño y piquín.

| Chile Jalapeño | | Chile Piquín | |
|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| pH 6 | pH 7 | pH 6 | pH 7 |
| AF + Ca 2 ml l ⁻¹ |
| AF + Ca 6 ml l ⁻¹ |
| AH + Fe 2 ml l ⁻¹ |

| l ⁻¹ | l ⁻¹ | l ⁻¹ | l ⁻¹ |
|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| AH + Fe 6 ml l ⁻¹ |
| SNC | SNC | SNC | SNC |
| SNs/Fe | SNs/Fe | SNs/Fe | SNs/Fe |
| SNs/Ca | SNs/Ca | SNs/Ca | SNs/Ca |

AF. Ácidos Fúlvicos; AH. Ácidos Húmicos; SNC. Solución; Nutritiva Completa; SNs/Ca. Solución Nutritiva sin Calcio; SNs/Fe. Solución Nutritiva sin Hierro.

El análisis estadístico consistió en el análisis de varianza (ANVA) con la posterior aplicación de la prueba de rangos múltiples de Tukey (P<0.05) una vez que el ANVA respectivo mostró diferencias significativas en los tratamientos, para ello se empleó el software estadístico MINITAB Versión 15.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Chile Jalapeño Área Radicular

En cuanto al área radicular con los tratamientos a pH 6, se encontraron diferencias altamente significativas. Con la adición del tratamiento AF + Ca 2 ml l⁻¹, se sobrepaso a la solución nutritiva completa en un 317%, con la aplicación de AH + Fe 2 ml l⁻¹ y SNs/Ca, presentaron los valores de 160 y 146 % respectivamente por encima de la SNC (Figura 2, Cuadro 3).

Longitud de Raíz

En cuanto a la longitud radicular se encontró diferencias estadísticas significativas en los tratamientos que se trabajaron a pH 6. El tratamiento AF + Ca 2 ml l⁻¹ fue 148% superior a la SNC (Figura 3, Cuadro 3).

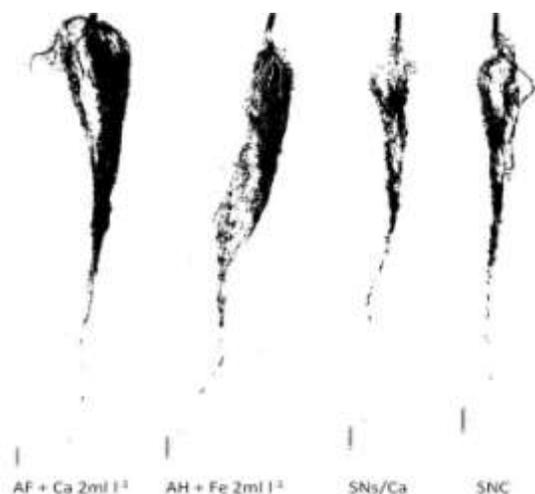


Figura 2. Imagen binaria de área radicular de chile jalapeño al adicionar ácidos húmicos y fúlvicos y diferentes composiciones de soluciones nutritivas a pH 6.



Figura 3. Imagen binaria de longitud de raíz de chile jalapeño al adicionar ácidos húmicos y fúlvicos y diferentes composiciones de soluciones nutritivas a pH 6.

Altura de Planta

En la variable AP la diferencia es altamente significativa, los tratamientos superiores a la SNC fueron AF + Ca 2 ml l⁻¹ en un 116%, AF + Ca 6 ml l⁻¹ con un 101% y AH + Fe 2 ml l⁻¹ a razón de 100.5% en la comparación general de medias (Cuadro 3).

Diámetro de Tallo

El DT muestra diferencia significativa, el tratamiento superior de esta variable fue obtenido por el tratamiento a pH 6, AH + Fe 2 ml l⁻¹, superando la SNC en un 137%, seguido de AF + Ca 2 ml l⁻¹ y SNs/Ca en un 108 y 102%, correspondientes a la media general (Cuadro 3).

Cuadro 3. Comparación de medias de las variables de chile jalapeño a pH 6 utilizando t-student (alpha 0.05 t=2.03011).

| | | Tratamiento | | Media |
|---------------------------------|------------------------------|------------------------------|---|----------|
| Altura Planta mm | AF + Ca 2 ml l ⁻¹ | A | | 413.714 |
| | AH + Fe 2 ml l ⁻¹ | A | | 410.879 |
| | SNC | A | | 405.204 |
| | AF + Ca 6 ml l ⁻¹ | A | | 394.219 |
| | SNs/Ca | A | B | 378.124 |
| | SNs/Fe | B | C | 322.736 |
| | | AH + Fe 6 ml l ⁻¹ | C | 271.212 |
| Área Raíz mm ² | AF + Ca 2 ml l ⁻¹ | A | | 4091.808 |
| | AH + Fe 2 ml l ⁻¹ | B | | 2740.103 |
| | SNs/Ca | B | | 2715.584 |
| | AF + Ca 6 ml l ⁻¹ | B | C | 2039.473 |
| | SNC | B | C | 1855.472 |
| | SNs/Fe | B | C | 1635.100 |
| | | AH + Fe 6 ml l ⁻¹ | C | 1371.705 |
| Diámetro Tallo mm | AH + Fe 2 ml l ⁻¹ | A | | 6.3740 |
| | AF + Ca 6 ml l ⁻¹ | B | | 5.181 |
| | SNs/Ca | B | C | 4.960 |
| | SNC | B | C | 4.882 |
| | AF + Ca 2 ml l ⁻¹ | B | C | 4.725 |
| | SNs/Fe | C | D | 4.454 |
| | | AH + Fe 6 ml l ⁻¹ | C | 3.990 |
| Longitud Raíz mm | AF + Ca 2 ml l ⁻¹ | A | | 404.167 |
| | AH + Fe 2 ml l ⁻¹ | A | B | 371.548 |
| | AF + Ca 6 ml l ⁻¹ | A | B | 361.437 |
| | SNC | A | B | 350.594 |
| | SNs/Ca | A | B | 346.098 |
| | SNs/Fe | B | C | 310.828 |
| | | AH + Fe 6 ml l ⁻¹ | C | 285.144 |

En cuanto a las variables evaluadas en chile jalapeño a pH 7, la respuesta significativa la mostro el tratamiento AH + Fe 2 m l⁻¹ en diámetro de tallo, superando a la solución nutritiva completa en un 128%, las demás variables evaluadas en sus diferentes tratamientos no fueron significativas (Cuadro 4).

Cuadro 4. Comparación de medias de las variables de chile jalapeño a pH 7 utilizando t-student (alpha 0.05 t=2.04841).

| | | Tratamiento | | Media |
|------------------|------------------------------|-------------|--|---------|
| Altura Planta | AH + Fe 2 ml l ⁻¹ | A | | 413.968 |
| | SNC | A | | 405.204 |

| | | | | |
|------------------------------|------------------------------|---|-----|----------|
| Mm | SNs/Ca | A | | 378.124 |
| | AF + Ca 6 ml l ⁻¹ | A | | 376.942 |
| | AF + Ca 2 ml l ⁻¹ | A | B | 354.242 |
| | SNs/Fe | A | B | 322.736 |
| | AH + Fe 6 ml l ⁻¹ | | B | 269.810 |
| Área Raíz mm ² | SNs/Ca | A | | 2715.584 |
| | AH + Fe 2 ml l ⁻¹ | A | B | 2503.506 |
| | AF + Ca 2 ml l ⁻¹ | A | B | 2291.240 |
| | AF + Ca 6 ml l ⁻¹ | A | B | 1859.192 |
| | SNC | A | B | 1855.472 |
| | SNs/Fe | A | B | 1635.100 |
| | AH + Fe 6 ml l ⁻¹ | | B | 1164.828 |
| Diámetro Tallo Mm | AH + Fe 2ml l ⁻¹ | A | | 6.1400 |
| | AF + Ca 6ml l ⁻¹ | A | B | 5.790 |
| | SNs/Ca | | B C | 4.960 |
| | SNC | | C | 4.882 |
| | SNs/Fe | | C | 4.4540 |
| Longitud Raíz Mm | AH + Fe 6 ml l ⁻¹ | | C | 4.368 |
| | AF + Ca 2 ml l ⁻¹ | | C | 4.186 |
| | AH + Fe 2 ml l ⁻¹ | A | | 368.008 |
| Longitud Raíz Mm | AH + Fe 6 ml l ⁻¹ | A | | 365.168 |
| | AF + Ca 6 ml l ⁻¹ | A | | 364.752 |
| | SNC | A | | 350.594 |
| | SNs/Ca | A | | 346.098 |
| | SNs/Fe | A | | 310.828 |
| | AF + Ca 2 ml l ⁻¹ | A | | 294.464 |

| | | | | |
|---------------------------------|------------------------------|---|---|----------|
| Área Raíz mm ² | AF + Ca 6 ml l ⁻¹ | A | | 296.749 |
| | AH + Fe 2 ml l ⁻¹ | A | | 2602.377 |
| | AF + Ca 2 ml l ⁻¹ | A | | 2406.243 |
| | SNs/Ca | A | B | 2168.855 |
| | SNC | A | B | 2139.346 |
| Diámetro Tallo mm | SNs/Fe | A | B | 1911.912 |
| | AH + Fe 6 ml l ⁻¹ | A | B | 1643.933 |
| | AF + Ca 6 ml l ⁻¹ | | B | 1104.247 |
| | AH + Fe 2 ml l ⁻¹ | A | | 4.925 |
| | SNs/Ca | A | | 4.856 |
| Longitud Raíz mm | AF + Ca 2 ml l ⁻¹ | A | | 4.595 |
| | AH + Fe 6 ml l ⁻¹ | A | | 4.445 |
| | SNC | A | | 4.081 |
| Longitud Raíz mm | AF + Ca 6 ml l ⁻¹ | A | | 4.007 |
| | SNs/Fe | A | | 3.879 |
| | AF + Ca 2 ml l ⁻¹ | A | | 239.422 |
| | SNs/Ca | A | | 228.703 |
| | SNC | A | | 212.175 |
| Longitud Raíz mm | AF + Ca 6 ml l ⁻¹ | A | | 207.031 |
| | AH + Fe 2 ml l ⁻¹ | A | | 200.248 |
| | SNs/Fe | A | | 200.178 |
| | AH + Fe 6 ml l ⁻¹ | A | | 198.309 |

Chile Piquín

De los tratamientos evaluados de las diferentes variables, longitud de raíz en el tratamiento AF + Ca 2 ml l⁻¹ a pH 7 (Cuadro 6) presento diferencia altamente significativa, el resto de los tratamientos no mostraron un comportamiento estadístico significativo (Cuadro5, Cuadro 6).

Cuadro 5. Comparación de medias de las variables de chile piquín a pH 6 utilizando t-student (alpha 0.05 t=1.99897).

| | Tratamiento | | Media |
|------------------------|------------------------------|---|---------|
| Altura Planta mm | AH + Fe 2 ml l ⁻¹ | A | 382.359 |
| | AF + Ca 2 ml l ⁻¹ | A | 367.148 |
| mm | SNs/Ca | A | 356.728 |
| | SNC | A | 328.880 |
| | AH + Fe 6 ml l ⁻¹ | A | 314.212 |
| | SNs/Fe | A | 304.784 |

Cuadro 6. Comparación de medias de las variables de chile piquín a pH 7 utilizando t-student (alpha 0.05 t=2.04841).

CONCLUSIÓN

Se puede establecer que el ácido fúlvico con calcio y húmico con hierro a razón de 2 ml l⁻¹, influyeron en las variables de AR, LR, AP y DT,

| | | Tratamiento | Media |
|---------------------------------|--|------------------------------|---------------|
| Altura Planta mm | | AF + Ca 2 ml l ⁻¹ | A 389.468 |
| | | SNs/Ca | A 372.567 |
| | | AH + Fe 2 ml l ⁻¹ | A 352.369 |
| | | SNC | A 328.880 |
| | | AH + Fe 6 ml l ⁻¹ | A 306.781 |
| | | AF + Ca 6 ml l ⁻¹ | A 284.425 |
| Área Raíz mm ² | | SNs/Fe | A 260.691 |
| | | AF + Ca 2 ml l ⁻¹ | A 2800.078 |
| | | SNs/Ca | A 2584.578 |
| | | AH + Fe 2 ml l ⁻¹ | A B 2553.333 |
| | | SNC | A B 2139.346 |
| | | AH + Fe 6 ml l ⁻¹ | A B 1664.031 |
| Diámetro Tallo mm | | SNs/Fe | A B 1530.229 |
| | | AF + Ca 6 ml l ⁻¹ | B 1032.939 |
| | | SNs/Ca | A 5.400 |
| | | AF + Ca 2 ml l ⁻¹ | A B 4.858 |
| | | AH + Fe 2 ml l ⁻¹ | A B 4.322 |
| | | SNC | A B 4.081 |
| Longitud Raíz mm | | SNs/Fe | B 3.795 |
| | | AH + Fe 6 ml l ⁻¹ | B 3.592 |
| | | AF + Ca 6 ml l ⁻¹ | B 3.574 |
| | | AF + Ca 2 ml l ⁻¹ | A 257.534 |
| | | SNs/Ca | A B 244.782 |
| | | SNC | A B C 212.175 |
| | | AH + Fe 6 ml l ⁻¹ | A B C 209.969 |
| | | AF + Ca 6 ml l ⁻¹ | A B C 196.901 |
| | | AH + Fe 2 ml l ⁻¹ | B C 187.858 |
| | | SNs/Fe | C 172.144 |

en Chile jalapeño.

Se puede observar que al adicionar los AF, sobrepasaron a todos los demás tratamientos, lo que podría presentarse por la gran cantidad de grupos oxhidrilos (OH) presentes en su estructura molecular, que podrían haber formado una capa de cargas negativas alrededor de la raíz y gracias a la presencia igualmente de grupos funcionales carboxilos (COOH), formando "puentes" con los cationes y así, se pueden fijar a las membranas celulares y las raíces adquieren un potencial negativo y por ende aumenta la absorción de cationes.

En cuanto al desarrollo radicular del Chile piquín se observa un aumento en cantidad y área ocupada cuando se le aplicaron los AF en baja concentración con calcio (2 ml l⁻¹); de esto se podría argumentar que los grupos funcionales oxhidrilos presentes en los compuestos orgánicos, realizaron el papel de hormonas que intervienen en el desarrollo radicular.

La raíz como órgano responsable de la capacidad de absorción de agua y nutrientes, en este sentido, depende directamente de su grado de desarrollo; es decir, de su desplazamiento de ramificación y de penetración; para el estudio de distribución de raíz un análisis secuencial con un periodo de tiempo de estudio más amplio, generaría de una forma efectiva una base de datos mayor y así obtener categorías más precisas.

El sustrato es un medio complejo con alta variabilidad espacial y temporal del medio ambiente en un amplio rango de escalas, incluidas las relativas a las raíces de las plantas. El sistema de raíces, con su amplio desarrollo, y estructura, se puede considerar como una respuesta evolutiva a la variabilidad espacio-tiempo en el suministro de recursos y las limitaciones asociadas al crecimiento.

Como consecuencia, la extensión en el espacio y el tiempo del sistema de raíces se rige por normas de desarrollo impulsado genéticamente que son modulados por las condiciones ambientales.

LITERATURA CITADA

- Atiyeh, R. M., C. A. Lee., C. A. Edwards., N. Q. Arancon, and J. D. Metzger. 2002. The influence of humic acids derived from earthworm-processed organic wastes on plant growth. *Bioresour Technol* 84:7-14.
- Cacco, G. and G. Dell'Agnola. 1984. Plant growth regulator activity of soluble humic complexes. *Can J Soil Sci* 64:225-228.
- Canellas, L. P., F. L. Olivares., A. L. Okorokova-Façanha, and A. R. Façanha. 2002. Humic acids isolated from earthworm compost enhance root elongation, lateral root emergence, and plasma membrane H⁺-ATPase activity in maize roots. *Plant Physiol* 130:1951-1957.
- Canellas, L. P., L. R. L. Teixeira-Junior., L. B. Dobbss., C. A. Silva., L. O. Médici., D. B. Zandonadi. and A. R. Façanha. 2008. Humic acids crossinteractions with root and organic acids. *Ann Appl Biol* 153:157-166.
- Canellas, L. P., D. B. Zandonadi., L. O. Médici., L. E. P. Peres., F. L. Olivares. and A. R. Façanha. 2005. Bioatividade de substâncias húmicas - ação sobre o desenvolvimento e metabolismo das plantas. In: Canellas, L. P., G. A. Santos. (eds) *Humosfera: tratado preliminar sobre a química das substâncias húmicas*. Campos dos Goytacazes, Rio de Janeiro, pp 238-239.
- Chen, Y. and T. Aviad. 1990. Effects of humic substances on plant growth, in P. MacCarthy, C.E. Clapp, R.L. Malcolm, and P.R. Bloom (eds.), *Humic Substances in Soil and Crop Sciences: Selected*

- Reading, Soil Sci. Soc. Am., Madison, WI, pp. 161-186.
- Cheng, W., D. C. Coleman. and J. E. Box Jr. 1991 Measuring root turnover using the minirhizotron technique. *Agric. Ecosyst. Environ.* 34, 261–267.
- Chukov, S. N. 2001. Structural and Functional Parameters of Soil Organic Matter under the Conditions of Anthropogenic Impact, St. Petersburg University Publishing House, St Petersburg.
- Evangelou, M., W. H. Hactice. and D. S. Andreas. 2004. The Influence of Humic Acids on the Phytoextraction of Cadmium from Soil. *Chemosphere.* 57 207—213
- Façanha, A. R., A. L. O. Façanha., F. L. Olivares., F. Guridi., G. A. Santos., A. C. X. Velloso., V. M. Rumjanek., F. Brasil., J. Schripsema., R. Braz-Wlho., M. A. Oliveira. and L. P. Canellas.. 2002. Bioatividade de ácidos húmicos: efeito sobre o desenvolvimento radicular e sobre a bomba de protons.
- Fründ, R., K. K. Guggenberg., H. Haider., I. Knicker., H. D. Kögel-Knaber., J. Lüdeman., W. Luster. And M. P. Spiteller. 1994. Recent advances in the spectroscopic characterization of soil humic substances and their ecological relevance. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.* 157: 175-186.
- González, R. C. and P. Wintz. 1977. Digital Image Processing. Adisson-Wesley.
- Govindasmy, R. and S. Chandrasekaran. 1992. Effect of humic substances on the growth, yield, and nutrient content of sugar cane. *Sci Total Environ* 117/118:575–581.
- Gorovaya, A. I., D. S. Orlov. and O. V. Scherbenko. 1995. *Humic Substances*, Naukova Dumka, Kiev.
- Heimann, M. and M. Reichstein (2008). Terrestrial ecosystem carbon dynamics and climate feedbacks. *Nature* 45:289–292. doi:10.1038/nature06591.
- Hendrick, R. L. and K. S. Pregitzer. 1993. Patterns of fine root mortality in two sugar maple forests. *Nature* 361, 59–61.
- Khristeva, L. A. 1970. Theory of humic fertilisers and their practical use in Ukraine, in R.A. Robertson (ed.), Proc. of 2nd Int. Peat Congress, Leningrad, HMSO, Edinburgh, pp. 543-550.
- Kononova, M. M. 1966. Soil Organic Matter, Pergamon, Oxford.
- Kramer, P. 1983. Water relations of plants. N.Y. Academic Press. Cap. 3 y 9.
- Lobartini, J. C. and K. H Tan. 1992. The geochemical nature and agricultural importance of commercial humic matter, *Sci. Total Environ.* 1/3, 1-5.
- López, S. R. 2009. Comportamiento de Tres Ácidos Fúlvicos en la Nutrición y Distribución de Raíz del Chile Piquín y Naranjo. Tesis de Maestría en Ciencias Forestales. Universidad Autonoma de Nuevo León, Linares, Nuevo León, México.
- Lozanovskaya, I. N., I. A. Luganskaya., G. A. Senchukov. and S. and V. Gninenko. 1991. Effectiveness of coal-humate fertilizers on irrigated chernozems of Rostov area, in E.V. Poluektov (eds.), *Remediation and Utilization of Low-Fertile Soils*, pp. 58-64.
- Lungley, D. R. 1973. The growth of root systems—a numerical computer simulation model. *Plant Soil* 38:145–159. doi:10.1007/BF00011223.
- Lynch, J. and K. M. Brown. 2001. Topsoil foraging—an architectural adaptation of plants to low phosphorus availability. *Plant Soil* 237:225–237. doi:10.1023/A:1013324727040.
- Lynch, J. and J. J. van Beem. 1993. Growth and architecture of seedling roots of common bean genotypes. *Crop Sci* 33:1253–1257.
- MacCarthy, P., C. E. Clapp., R. L. Malcolm. and P. R. Bloom (eds). 1990. Humic Substances in Soil and Crop Sciences: Selected Readings, Soil Sci. Soc. Am., Madison, WI.
- Maccarthy, P. 2001. The principles of humic substances. *Soil Science.* 166:738-751.
- Manschadi, A. M., J. Christopher., P. deVoil. and P. G. L. Hammer. 2006. The role of root architectural traits in adaptation of wheat to water-limited environments. *Funct Plant Biol* 33:823– 837. doi:10.1071/FP06055.
- Masciandaro, G. B. Ceccanti. and C. Garcia. 1999. Soil agro-ecological management: fertirrigation and vermicompost treatments. *Bioresour Technol* 59:199–220.
- Mbagwu, J. S. C. and A. Piccolo. 1997. Effect of humic substances from oxidized coal on soil chemical properties and maize yield, in J. Drozd, S.S. Gonet, N. Senesi, and J. Weber (eds), *The Role of Humic Substances in Ecosystems and in Environmental Protection*, PTSH, Wroclaw, Poland, pp. 921-925.
- Muscolo, A., F. Bovalo., F. Gionfriddo. and S. Nardi. 1999. Earthworm humic matter produces auxin-like eVects on *Daucus carota* cell growth and nitrate metabolism. *Soil Biol Biochem* 31:1303– 1311.
- Nardi, S., A. Muscolo., S. Vaccaro., S. Baiano., R. Spaccini. and A. Piccolo. 2007. Relationship between molecular characteristics of soil humic fractions and glycolytic pathway and Krebs cycle in maize seedlings. *Soil Biol Biochem* 39:3138– 3146.
- Nar, L. F. 2005. Diagnóstico del sistema productivo chile jalapeño. Promotora de Servicios Comerciales del Estado de Campeche. Consultado el 17-9-07. Disponible en <http://www.campeche.gob.mx/Campeche/Gobierno/Organismos>.
- Noble. A. D., P. J. Randall. and T. R. James 1995. Evaluation of two coal-derived organic products in ameliorating surface and subsurface soil acidity, *Europ. J. Soil Sci.* 46, 65-75.
- Pagès, L. and F. Aries. 1988. SARAH: a simulation model of the growth, development and architecture of root systems. *Agronomie* 8:889–896. doi:10.1051/agro:19881008.
- Piccolo, A., G. Pietramellara. and J. S. C. Mbagwu. 1997. Use of humic acids substances as soil

- conditioners to increase aggregate stability, *Geoderma* 75, 267-277.
- 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* 63:1801-1810.
- Pinton, R., S. Cesco., G. Iacoletti., W. S. Astol. and Z. Varanini. 1999. Modulation of NO_3^- uptake by water-extractable humic substances: involvement of root plasma membrane H^+ -ATPase. *Plant Soil* 215:155-161.
- Pizzeghello, D., G. Nicolini. and S. Nardi. 2001. Hormone-like activity of humic substances in *Fagus sylvatica* forests. *New Phytol* 151:647-657.
- Quaggiotti, S., B. Rupert., D. Pizzeghello., O. Francioso., V. Tugnoli. and S. Nardi. 2004. Effect of low molecular size humic substances on nitrate uptake and expression of genes involved in nitrate transport in maize (*Zea mays* L.). *J Exp Bot* 55:803-813.
- Rauthan, B. S. and M. Schnitzer. 1981 Effects of soil fulvic acid on the growth and nutrient content of cucumber (*Cucumis sativus*) plants, *Plant and Soil* 63, 491-495.
- Rasse, D., P. Longdoz. and B. Ceulemans. 2001. TRAP: a modeling approach to below-ground carbon allocation in temperate forests. *Plant Soil* 229:281-293. doi:10.1023/A:1004832119820
- Ray, J. C. and K. J. George. 2010. Calcium Accumulation in Grasses in Relation to their Root Cation Exchange Capacity. *Journal of Agronomy*. 9 (2):70-74.
- Reubens, B., J. Poesen., G. Geudens. and B. Muys. (2007) The role of fine and coarse roots in shallow slope stability and soil erosion control with a focus on root system architecture: a review. *Trees* 21:385-402. doi:10.1007/s00468-007-0132-4.
- Rodríguez-Del Bosque, L. A., M. Ramírez-Meraz. y O. Pozo-Campodónico. 2003. El cultivo del chile piquín bajo diferentes sistemas de producción en el noreste de México. En: Rodríguez del Bosque, L. A. (ed.). Memoria del primer Simposio Regional de Chile piquín: Avances de Investigación en Tecnología de Producción y Uso Racional del Recurso Silvestre. INIFAP-CIRNE. Campo Experimental Río Bravo. Publicación Especial Núm. 26. México. Pp. 1-16.
- Rosenfeld, A. 1979. Some experiments on variable thresholding. *Pattern Recognition*, 11: 191.
- Rubio, G., H. Liao., X. L. Yan. and J. P. Lynch. 2003. Topsoil foraging and its role in plant competitiveness for phosphorus in common bean. *Crop Sci* 43:598-607.
- Schnitzer, M. 2000. Life Time Perspective on the Chemistry of Soil Organic Matter. D. L. Sparks (Ed.). *Advances in Agronomy*, Academic Press. 98: 3-58.
- Sistema Nacional de Informacion e Integracion de Mercados (SNIIM). 2006. Boletín Informativo; Producción de Chile. En línea. Consultado el 17-9-07. Disponible en <http://www.agrochiapas.gob.mx/sitio/archivos>.
- Slatyer, R. 1967. *Plant water relationships*. N.Y. Academic Press. Cap. 5. SLADKY, Z. 1959. The effect of extracted humus substances on growth to tomato plants. *Biol. Plant.* 1:199-204.
- Tjurin, I. V. 1937. *Soil Organic Matter*, Nauka, Moscow.
- Tobin, B., J. Čermák., D. Chiatante., F. Danjon., A. Di Iorio., L. Dupuy., A. Eshel., C. Jourdan., L. R. Kalliokoski., N. Nadezhdina., B. Nicoll., L. Pagès., J. Silva. and I. Spanos. 2007. Towards developmental modelling of tree root systems. *Plant Biosyst* 141:481-501. doi:10.1080/11263500701626283.
- Ulanov, N. N. 1993 Possibilities of use of oxidized coal and humic substances in agriculture, in D.S. Orlov (eds.), *Humic Substances in Biosphere*, Nauka, Moscow, pp. 157-162.
- Upchurch, D. R. 1987. Conversion of minirhizotron-root intersections to root length density. In *Minirhizotron observation tubes: methods and applications for measuring rhizosphere dynamics*. Ed. H M Taylor. ASA Special Publication no. 50, Madison, WI, pp 51-65.
- Van de Venter, H. A., M. Furter., J. Dekker. And I. J. Cronje. 1991. Stimulation of seedling root growth by coal-derived sodium humate, *Plant and Soil* 138, 17-21.
- Vaughan, D. and D. J. Linehan. 1976. The growth of wheat plants in humic acid solutions under axenic conditions, *Plant and Soil* 44, 445-449.
- Visser, S. A. (1986) Effects of humic substances on plant growth, in R.G. Burns, Dell'Agola, and S. Miele (eds.), *Humic Substances: Effects on Soil and Plants*. Reda, Rome, pp. 89-135.
- Waksman, S.A. (1932) *Humus*, Williams and Wilkins, Baltimore.
- Zandonadi, D. B., L. P. Canellas. and A. R. Façanha. 2007. Indolacetic and humic acids induce lateral root development through a concerted plasmalemma and tonoplast H^+ pumps activation. *Planta* 225:1583-1595.

CAPITULO III

COMPORTAMIENTO DE UN HUMATO DE CALCIO Y FULVATO DE HIERRO EN LA POROSIDAD DE UN SUELO CALCISOL

RESUMEN

Los ácidos húmicos, y fúlvicos, definidos como macromoléculas orgánicas, con estructura química compleja, distinta y estable que su forma original, contribuyen en los procesos físicos directos o indirectos en la estabilidad de los agregados del suelo, por lo que implementar una técnica de impregnación con resina permite la cuantificación de la agregación del suelo en muestras sin disturbar es esencial en conservar su estructura original, la posibilidad de realizar cortes verticales u horizontales y homogeneidad perfecta de la superficie del bloque para su análisis por medios digitales, los tratamientos AF + Fe 2 mL L⁻¹ pH 6 y AF + Fe 2 mL L⁻¹ pH 7 resultaron en la agregación superior al resto de los tratamientos.

Palabras clave: ácidos orgánicos enriquecidos con calcio y hierro, porosidad, análisis de imagen.

SUMMARY

Humic acids and fulvic acids, defined as organic macromolecules with complex chemical structure, distinct and stable than their original form, physical processes contribute directly or indirectly on the stability of soil aggregates. Implementing a resin impregnation technique can allow quantification of soil aggregation. Undisturbed samples are essential to retain its original structure, the possibility of vertical or horizontal cuts with perfect homogeneity of the block surface was analyzed by digital means, treatments AF + Fe 2 mL L⁻¹ pH 6 and AF + Fe 2 mL L⁻¹ pH 7 aggregation resulted in superior to other treatments.

Keywords: organic acids enriched with calcium and iron, porosity, image analysis.

I. INTRODUCCIÓN

El sistema de poros del suelo rige la vida de muchos de los ecosistemas terrestres, las distribuciones de tamaño de agregados del suelo se utilizan para caracterizar la estructura del suelo, los agregados representan grupos de partículas primarias que cohesionan entre sí, la compactación del suelo puede dañar seriamente la estructura física de un suelo fértil; los impactos en los macro poros son de particular interés, ya que estas estructuras desempeñan un papel crucial en muchos procesos del suelo, tales como drenaje o aireación. Varios estudios indican que los poros difieren en origen, forma y tamaño puede variar considerablemente en su capacidad de compresión, Ringrose-Voase y Bullock (1984) propusieron dividir los poros en cuatro clases morfológicas, huecos, de embalaje, planos y canales, resultado del embalaje individual. La investigación sobre la agregación del suelo están centrados en la estabilidad de la influencia de la agregación sobre la estructura del suelo y la función recuperada, es decir, la materia orgánica, la protección y la dinámica; estructuralmente la agregación influye directamente en las propiedades del suelo tales como la densidad aparente y distribución de tamaño de poro e indirectamente a la estructura sirviendo como un núcleo para la formación de agregados, también está estrechamente ligada a la función del suelo mediante la protección física, ofrece una piscina de energía metabólica para los microbios y nutrientes para las plantas.

La agregación del suelo está bajo el control de diferentes mecanismos en diferentes tipos de suelo, partículas de arcilla floculada o sus complejos con humus actúan como agentes cementantes principales. El efecto de cementación del Fe libre

y óxidos de Al es importante en suelos con bajo contenido de materia orgánica, en general, el nivel de agregación y estabilidad de agregados aumenta con el aumento de contenido de materia orgánica, el área de superficie de los minerales de arcilla y la capacidad de intercambio de cationes; la estabilización de los agregados del suelo se lleva a cabo como un resultado de la acción de cementación de compuestos inorgánicos y orgánicos dentro del suelo. La estabilidad de los agregados puede verse afectada por factores abióticos (minerales de arcilla, cationes intercambiables), los factores bióticos (materia orgánica, actividades de raíces de las plantas, la fauna del suelo y microorganismos) y los factores ambientales (temperatura del suelo y la humedad). Junto a las propiedades del suelo el manejo también influye de manera muy importante en la estabilidad de la estructura del agregado, por la labranza del suelo se mezcla y nuevos agregados son expuestos. Los sistemas porosos del suelo están influenciados por factores mineralógicos, la etapa de desintegración, la materia orgánica, el contenido de agua en el suelo, los procesos de transporte dentro del perfil del suelo, tiempo, las raíces de las plantas y los organismos del suelo. La materia orgánica del suelo es la fuente más importante de nutrientes y regula las principales características físicas, químicas y biológicas de los diferentes suelos. Un conjunto fundamental de cuestiones relacionadas con las condiciones de formación de humus, son el enfoque de zona genética, la naturaleza biogeoquímica del proceso de humificación, los efectos de la termodinámica y la cinética de dirigir la síntesis y la degradación de las sustancias húmicas así como la variabilidad de las propiedades de las sustancias. Las formas y los tamaños de los poros del suelo pueden ser estudiado en imágenes de secciones delgadas tomadas a diferentes

aumentos, la deformación de la estructura de los macro poros bajo cargas mecánicas se pueden analizar de manera eficiente mediante morfometría cuantitativa, como resultado, su distribución de tamaños y la estabilidad son factores importantes en la comprensión de los procesos del suelo que se producen en virtud de diversos terrenos o sistemas de prácticas agrícolas.

1.1 HIPÓTESIS

- El comportamiento de los humatos de calcio y fulvatos de hierro han mostrado efectos en el aumento de la porosidad y estabilidad de agregados del suelo, por lo que es posible su cuantificación.
- Los humatos de calcio y fulvatos de hierro, permiten una mejor estabilidad de agregados en suelos calcáreos, por lo tanto la impregnación de resinas permitirá la cuantificación de la porosidad.

1.2 OBJETIVO

- Determinar el comportamiento de un humato de calcio y un fulvato de hierro en la porosidad de un suelo calcisol.
- Evaluar humatos de calcio y fulvato de hierro a dos concentraciones, con el uso de una técnica de impregnación de resinas en el suelo que permita la cuantificación de la porosidad en muestras sin disturbar.

1.3 META

Obtener la descripción del comportamiento de humato de calcio fulvato de hierro, en la porosidad de un suelo calcisol.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

La porosidad es la relación entre el volumen de los espacios vacíos y el volumen total de la masa del suelo (Stengel, 1997). En un suelo hay varios tamaños de poros y cada uno tiene una función específica. Poros grandes y medianos: facilitan la aireación y la infiltración, permiten la circulación del aire y el agua. Poros pequeños o microporos: conducen y almacenan agua. La proporción de poros grandes y pequeños en el suelo permite establecer un equilibrio aire-agua. Los poros permiten el desarrollo y la nutrición de la raíz y planta y toda actividad del suelo (González y Sánchez, 2004).

La porosidad del suelo se determina principalmente por el acomodo de las partículas sólidas. Los suelos arcillosos y orgánicos, ricos en coloides, generalmente tienen altos valores de porosidad alrededor de $0.6 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ debido a que las cargas eléctricas de estos coloides generan un acomodo de partículas con mucho espacio libre (poros). Los suelos arenosos contienen bajos valores de porosidad, debido a la baja capacidad reactiva de sus partículas; sus valores aproximados son de $0.4 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$. En suelos compactados se pueden observar valores de porosidad de $0.3 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ (García, 2005).

Los poros por su diámetro, son clasificados conceptualmente, como macroporos y microporos; los macroporos permiten el libre movimiento de agua y aire, y miden más de 30 micras de diámetro. Los microporos tienen menos de 30 micras de diámetro y retienen entre este valor y 0.2 micras el agua que

generalmente utilizan las plantas. Los poros de menor diámetro retienen muy fuertemente el agua del suelo (Narro, 1994).

El tamaño de los poros también tiene importancia en el crecimiento de las raíces. El diámetro promedio de estas en plantas anuales es de alrededor de 0.03 cm., con pelos radicales de 0.001 cm. El volumen del suelo ocupado por las raíces es de alrededor de 1% (Shaxson y Barber, 2003).

La importancia agrícola de la porosidad del suelo es muy grande y sus características dependen de la textura, estructura, contenido de materia del suelo, tipo e intensidad de cultivos, labranza y otras características del suelo y su manejo. Como regla general, los suelos bajo sistemas de producción agrícola intensiva tienden a compactarse, y al reducir su porosidad pierden parte de su potencialidad de producción (Narro, 1994).

La porosidad es la cuantificación del espacio ocupado por poros en un sustrato y también se denomina espacio de poros, espacio poroso o espacio vacío. Normalmente se expresa como porcentaje respecto al volumen aparente del sustrato. El volumen aparente es el volumen que ocupa un sustrato incluyendo la materia sólida y los poros internos y externos, tanto los abiertos como los cerrados. La Densidad Aparente (D_a) es la relación entre la masa de las partículas y el volumen aparente que ocupan. La porosidad externa es la que se genera por el propio empaquetamiento de las partículas y depende del modo de empaquetamiento como por: tamaño del contenedor, forma, tamaño y naturaleza de las partículas. La porosidad interna depende de la naturaleza de las partículas, estado e interconexión

de los poros. La porosidad interna puede estar abierta o cerrada. Los poros abiertos son los que tienen conexiones con el sistema de poros externos y también se denominan poros percolantes. Los poros cerrados o no percolantes son los que no tienen conexión con el sistema de poros externos. La porosidad efectiva es la porosidad percolante, abierta o interconectada, que es la que contribuye a la retención y movimiento del agua en el suelo (Burés, 1997).

El espacio de los poros de un suelo es la porción ocupada por aire y agua. La cantidad de este espacio viene determinada casi totalmente por la colocación de las partículas sólidas. Si ellas tienden a ligarse estrechamente entre sí, como en las areniscas o en subsuelos compactos, la porosidad total es baja. Si se colocan en agregados porosos, como en el caso frecuente de una textura media de los suelos altos en materia orgánica, el espacio de los poros será más elevado, por unidad de volumen (Burés, 1997). En los suelos existen en general dos tipos de poros, macro y microporos. Mientras no se exija una línea sutil de demarcación, diremos que los macroporos están caracterizados por permitir el libre movimiento del aire y la filtración del agua. Por el contrario, en el microporo de poro, el movimiento del aire está casi enteramente impedido y el del agua muy restringido, hasta incluso retardar el movimiento capilar. Así, en un suelo arenoso, a pesar de su porosidad total baja, el movimiento del aire y del agua es sorprendentemente rápido por el predominio de los microespacios (Buckman y Brady, 1991).

En el suelo se distinguen tres tipos de poros en función de su tamaño; macro, meso y micro poro. Los macro poros, o porosidad no capilar, está formada por espacios grandes, ocupados frecuentemente por aire. A menudo se presentan en

forma de grietas que separan los agregados e incluso penetran en los mismos. Su importancia depende sobre todo de la estructura del suelo, su grado de fisuración y parcialmente de la textura, donde es más elevada en los suelos arenosos. Los microporos dependen también de la estructura pero sobre todo de la textura (arcilla) y de la actividad biológica. Es muy grande en los suelos ricos en elementos finos y en los dotados de una microfauna numerosa y activa (Fitzpatrick, 1987). Toda la diversidad de los poros del suelo puede subdividirse en dos grandes grupos genéticos: poros que están relacionados con el embalaje de los elementos estructurales del suelo (huecos de embalaje) y los poros que no están relacionados con el embalaje de estos elementos. Los poros del primer grupo son esenciales y permanentes en todo sistema disperso. En los suelos, que están representados por embalaje huecos de varios órdenes, incluyen huecos entre los agregados (poros inter agregados) y entre las partículas separadas. Una característica específica de estos poros es su dependencia de la forma y orientación de las unidades estructurales del suelo. Los poros del segundo grupo se encuentran tanto en la estructura (pedal) y no la estructural de la masa (masivo, apedal) del suelo. Con respecto a su ubicación en la masa del suelo estructurado, estos pueden pertenecer a los grupos de poros inter, intra y trans agregados. Con respecto a su génesis, se pueden subdividir en los huecos relacionados con la actividad de la biota del suelo (canales biogénicas y cámaras) y huecos formando bajo el impacto de física o perturbación química de la continuidad del medio de suelo (poros vesiculares, los poros de lixiviación y varias fisuras) (Parfenova *et al.*, 1977).

La presencia de poros que no están relacionadas con unidades estructurales amplía el punto de vista sobre el papel del espacio de los poros en la organización estructural de los organismos del suelo. Los vacíos en su embalaje pueden ser considerados una función y estructura del suelo (estado de agregación) (Voronin, 1984), mientras que los poros de la génesis biológicas, físicas y químicas juegan su función propia que afecta directamente las características morfológicas y propiedades estructural-funcionales del suelo. Por lo tanto, los poros vesícula crean una estructura específica del horizonte (Verba *et al.*, 2003; Levedeba *et al.*, 2009).

El uso intensivo y prácticas inoportunas de labranza a lo largo de estos 40 años, ha conducido a la degradación estructural del suelo afectando principalmente las capas superficiales y subsuperficiales, lo que puede ser descrito y cuantificado a partir de la abundancia relativa y de la distribución espacial de espacio poroso (González, 1995). Diferentes composiciones de la estructura del suelo dan como resultado de la pedogénesis y el manejo del suelo se reflejan en muchas de las propiedades tales como la estabilidad de los agregados, la configuración del sistema poroso del suelo y las propiedades hidráulicas. La agregación del suelo se da bajo el control de diferentes mecanismos en diferentes tipos de suelo, partículas de arcilla floclada, o sus complejos con humus, complejos orgánicos minerales y la materia orgánica del suelo actúan como agentes principales de cementación en el desarrollo de los agregados del suelo. El efecto de cementación de óxidos libres de Fe y Al es importante en suelos con bajo contenido de materia orgánica (Six *et al.*, 2002). En general, el nivel de agregación y estabilidad de agregados se incrementa con el aumento del contenido de materia orgánica, la superficie de los minerales de arcilla y

la capacidad de intercambio catiónico (Bronick y Lal, 2005). Junto a las propiedades del suelo, el manejo de este tiene también influencia muy importante en la estabilidad de la estructura del suelo. Por labranza del suelo, incorporación vegetal nuevos agregados están expuestos a diversos mecanismos de degradación (Six *et al.*, 1998). Manejo inadecuado en la humedad del suelo, cruce de maquinaria pesada y el efecto peptización de fertilizantes también tiene influencia negativa en la estructura del suelo (Pagliai *et al.*, 2003, 2004). Sistemas porosos del suelo están influenciadas por factores similares, incluyendo la composición mineralógica, la etapa de desintegración, materia orgánica, el contenido de agua del suelo, los procesos de transporte dentro del perfil del suelo, el clima, las raíces de las plantas, los organismos del suelo y las prácticas de gestión. Pagliai y Pezzarossa (1990), comentan que las formas y los tamaños de los poros del suelo pueden ser estudiados en imágenes de secciones delgadas, tomadas a diferentes aumentos. Los sistemas de poros y su impacto, se estudiaron previamente por Bouma *et al.* (1977, 1979) bajo diferentes prácticas de manejo también fueron estudiados por Pagliai *et al.* (1983, 2003, 2004).

La evolución de la estructura de las capas superficiales y subsuperficiales del suelo, resulta en parte el impacto de las prácticas de labranza. Por lo tanto el funcionamiento hídrico (retención, infiltración y escurrimiento) de estas capas está en función del arreglo de la estructura (SAGARPA, 2004).

La naturaleza poligénica de los poros del suelo nos permite conocer el estado de espacio del poro en el perfil de suelo, es uno de los índices básico de la organización estructural de perfiles. Para caracterizar el espacio de los poros del

suelo se utilizan los valores del total y diferencial de porosidad, sin embargo, incluso la diferenciación más detallada de los poros del suelo con respecto de sus volúmenes no proporciona información adecuada en el carácter de la porosidad del suelo, debido a que la relación entre los volúmenes de los poros del de diferente tamaños no reflejan la estructura del espacio poroso del suelo en plena medida. Espacio poroso del suelo se caracteriza no sólo por la distribución de tamaño de poro, sino también por la forma, orientación, y la mutua disposición de poros en la masa de suelo. Un conjunto de estos índices lleva la máxima cantidad de información de la génesis y las funciones de espacio de los poros. A menudo, la génesis de los poros del suelo es refleja directamente en sus nombres: cámaras biogénicas, vacíos entre los granos del esqueleto de embalaje, etc. Por lo tanto, una caracterización completa de un espacio poroso del suelo debe incluir su perfil característico morfológico y morfométrico.

Se sabe que una similitud definida en los objetivos y métodos de tratamientos agrícolas del suelo favorece el desarrollo de algunas de las características comunes o cerca de los suelos de diferentes génesis. Ya en la década de 1950, Blagovidov señaló (1954) que los objetivos y resultados de la explotación agrícola de los suelos tienen un interzonal carácter, que se manifiesta por la convergencia de los principales parámetros agronómicos (estructura, porosidad, el contenido de humus, el grado de procesamiento zoogenico de la masa del suelo, etc.) en el principio diferente genética de tipos de suelo. Estudios recientes también apuntan a la convergencia de las propiedades del suelo en el curso del cultivo en diferentes zonas naturales (Andronikov *et al.*, 1989).

La edafología moderna ha acumulado un vasto cuerpo de datos concretos sobre las propiedades de los suelos en agro-sistemas de diferentes zonas naturales sometidos a diversos impactos antropogénicos. Estos materiales constituyen una base sólida para la generalización teórica de los conocimientos disponibles, al mismo tiempo, la adquisición de nuevos datos sobre las propiedades del suelo con el uso de técnicas modernas es necesario para resolver muchos de los problemas teóricos y aplicados, en particular, la nueva información se requiere para una evaluación integral de las principales características del suelo estructurado y funcional (Shishov *et al.*, 1991). Los suelos naturales difieren de materiales parentales y de uno al otro en el carácter de la distribución de características pedo genéticas en los perfiles del suelo, patrones de distribución del contenido de materia orgánica, diversos edaforrasgos, estructura del suelo, y otras características se pueden analizar. Los suelos también difieren unos de otros en la organización de su espacio poroso. Por analogía podemos distinguir los poros por el diagnóstico espacial de perfiles que representan el sistema de poros del suelo en la secuencia vertical de horizontes.

La búsqueda de técnicas o métodos de análisis que consideren la observación y cuantificación de los espacios vacíos a la escala mm^2 sobre muestras de suelo no alteradas condujo a establecer un método de aproximación para caracterizar morfológicamente la porosidad mediante un análisis de imagen. La descripción de la porosidad del suelo considerando solo su volumen no es suficiente para explicar el impacto del manejo del huerto en la condición física y dinámica que sigue el agua en el suelo, por lo que las características del espacio poroso basado

en su organización y su distribución espacial puede ser descrito y cuantificado a partir del análisis de imagen. (González y Sánchez, 2004).

El uso del concepto de arquetipos en la descripción del espacio poroso del suelo se justifica por el complejo de disposición espacial (arquitectura) de los poros del suelo. Independientemente de la calidad de los objetos analizados (imágenes 2D o 3D), el análisis de los espacios porosos se complica por la alta variabilidad espacial de sus principales características. Un diagnóstico generalizado de poros en el perfil de los suelos puede ser interpretado de diferentes maneras. En términos de taxonomía, podemos considerar que es un promedio, o un referente del espacio que describe un grupo de los suelos (Rozhkov, 2009), la caracterización de los poros del suelo y el significado de las diferencias o similitudes, debe ser estimado con la debida atención al problema específico y de los índices particulares. En cualquier caso, el estudio de los patrones de distribución de índices morfométricos de los poros del suelo en el perfil, nos da información necesaria para la construcción generalizada de espacios de poros.

Datos morfométricos cuantitativos forman la base para un nuevo enfoque hacia la caracterización de la porosidad del suelo. La noción de arquetipo es tomada de la mereología, la ciencia que estudia la estructura (relaciones parte y el todo) de objetos clasificados (Meien *et al.*, 1976; Panova *et al.*, 1975). En términos de mereología, diferentes variantes y morfología de poros en estructuras de suelo u horizontes genéticos, que son caracterizados por conjuntos definidos de índices morfométricos, cuando son analizados en conjunto, nos dan una imagen integral de la porosidad del suelo en el espacio de un perfil.

La porosidad depende de la textura, de la estructura y de la actividad biológica del suelo. Para una correcta aireación del suelo y una buena retención de agua, es conveniente que la porosidad se sitúe entre el 40 % y el 60 %. Valores menores del límite inferior pueden crear asfixia en las raíces, contenidos de agua retenida muy bajos, o ambas cosas a la vez. Un valor superior al límite máximo supone una dificultad para el contacto entre el suelo y las raíces de las plantas (Donrroso, 2003).

Una porosidad elevada es favorable a la vegetación ya que facilita el arraigamiento, asegura la conservación de agua y favorece los cambios entre el vegetal y el suelo, permitiendo la difusión de agua y aire. Pero el espacio poroso se halla distribuido entre toda la masa del suelo, existiendo huecos de diferentes formas y tamaños con orientaciones muy distintas (Baver *et al.*, 1980).

La morfometría del suelo representa una de las prometedoras ramas de la micro-morfología del suelo. En la actualidad, la morfometría del suelo se basa en un análisis por computadora de las imágenes en 2D y 3D de las muestras de suelo con una imperturbable estructura. Un análisis micro-morfo-métrico automatizado tiene todas las ventajas de la micromorfología tradicional del suelo; al mismo tiempo, se excluye el principal inconveniente de este método, es decir, el carácter subjetivo de los datos obtenidos durante el estudio de secciones delgadas.

Durante los 50 años de historia de investigaciones micromorfométricas en la ciencia del suelo, parámetros cuantitativos de cambios radiculares en la morfología de los diversos suelos, bajo el impacto de su uso agrícola se han obtenido. Por lo

tanto, se ha establecido que la labranza del suelo, aumenta el número y el volumen total de macro-poros en el horizonte arado, el perímetro total de macroporos también aumenta y se convierte en su forma más complicada (Clark *et al.*, 2002).

Sin embargo, los datos disponibles sobre rasgos morfométricos en suelos arados son estrictamente especificados. Caracterizan cambios en la estructura y la porosidad del suelo bajo el impacto de la labranza. Como ha señalado Dobrovolskii (1988), con el fin de entender la esencia genética de estos cambios, es necesario comparar los datos morfológicos y morfométricos en los horizontes de arado de los suelos en diferentes zonas naturales. Este es un reto para morfología del suelo en general y micro morfometría del suelo como una rama cuantitativa de suelo en particular.

El Análisis de Imagen, es utilizado en la separación, identificación y en ocasiones cuantificación de las distintas partes de un sistema complejo. Este sistema complejo en el caso del Análisis de Imagen, se define en la imagen. La imagen es una percepción visual de la realidad, no es la realidad. Nosotros percibimos las imágenes con la ayuda del cerebro y el órgano visual. Además de generar imágenes, el cerebro humano puede operar con imágenes. Las principales operaciones son mencionadas por López *et al.* (1994), como sigue:

- 1.- Globalizar y cuantificar características de las imágenes.
- 2.- Comparar y clasificar imágenes.

Ante las limitaciones del cerebro humano para obtener información a partir de las imágenes, el hombre ha aprendido a utilizar técnicas auxiliares. Esa mejora se

consigue a tres niveles distintos de capacidad, análisis y procesado (Sanpedro,1995), los que se describen a continuación.

La captación. Constituye un paso intermedio entre la realidad y nuestra percepción de la misma. A ese nivel, se ha desarrollado una serie de técnicas que permiten conseguir una percepción no humana de la realidad y con ello, indiferir la auténtica percepción y hacerla altamente objetiva. Para ello se utiliza una serie de soportes que permiten la obtención posterior de las imágenes. Estamos hablando de las cámaras fotográficas y de vídeo.

El análisis. Se trata de cualquier proceso mediante el que se pueda extraer información cuantitativa de una imagen.

El procesado. Se trata de cualquier manipulación de una imagen para producir otra, generalmente con la intención de analizarla después, de acuerdo a diferentes componentes de interes.

Las imágenes surgen de la interferencia entre ondas electromagnéticas y objetos materiales. De acuerdo con la clase de interferencia distinguimos tres tipos de imagen, de transmisión, reflexión y emisión (Pertusa, 2003):

Imágenes de transmisión. En estas, las ondas electromagnéticas atraviesan el objeto, el cual se muestra más o menos resistente al paso de las mismas. En nuestra percepción, el órgano visual detecta como más intensos los puntos del objeto más permeables al paso de las ondas. Para que se pueda dar esta transmisión de ondas a pesar de la resistencia del paso de los objetos, éstos deben ser objetos finos.

Imágenes de reflexión. Aquí las ondas inciden sobre el objeto y se reflejan con un ángulo que depende principalmente del ángulo de incidencia. Se obtienen imágenes de este tipo mediante la lupa binocular y el microscopio electrónico de barrido.

Imágenes de emisión. Estas se producen por las ondas emitidas por el objeto, previa excitación por radiación de determinada longitud de onda.

El caso más característico es el del microscopio de fluorescencia, donde los objetos son iluminados con longitudes de onda apropiadas para producir la absorción de determinadas radiaciones (azul, violeta, ultravioleta) y la emisión de otras (a menudo roja, amarilla, verde y azul) (Ballarol, 2002).

Cuando obtenemos imágenes tenemos un problema inherente y es que se da una pérdida de información respecto a la realidad. Vivimos en un mundo tridimensional y nos movemos en el espacio, pero cuando se capta una imagen obtenemos una percepción bidimensional porque en su elaboración, se tiene una proyección de ondas electromagnéticas sobre un plano. En el caso de un ojo este plano es su retina; en las cámaras fotográficas, su placa; en las cámaras de vídeo, sus sensores. A pesar de esto, las personas pueden percibir sensaciones espaciales, elaboradas por nuestro cerebro a partir de información virtual especial contenida en las imágenes. Es el caso de las líneas de fuga, que son líneas concurrentes en un punto de la imagen que dan la sensación de perspectiva o las luces y las sombras (Martínez y Sanpedro, 1995).

Por otra parte, la información que percibimos en una imagen es de dos tipos: espacial, tal como la forma, el tamaño o la distribución de los objetos, y espectral, relacionada con la intensidad con la que se reciben los tres colores básicos rojo, verde y azul de las imágenes cromáticas. Esa información, podemos vincularla a los puntos de un sistema cartesiano de cinco coordenadas: dos espaciales, correspondientes a la proyección plana de los objetos, y tres cromáticas (Balbuena, 2006):

Coordenadas espaciales (X, Y).

Coordenadas espectrales (rojo, verde, azul).

En ocasiones, debido a las herramientas usadas para la obtención de imágenes o para poder trabajar mejor con las mismas, se realiza una conversión de imágenes cromáticas (color) en monocromáticas (escala de grises) o en binarias (sólo dos colores). Esta conversión reduce el número de coordenadas a tres (Ballarol, 2002):

Coordenada espacial (X).

Coordenada espacial (Y) coordenada de intensidad de luz monocromática o binaria.

Por lo general, las imágenes que obtenemos a través de sistemas de captación no son apropiadas para someterlas a análisis. A menudo, para eso necesitamos transformarlas y esa transformación requiere la conversión de magnitudes analógicas en digitales. Como sabemos, las magnitudes analógicas poseen variación continua y por ello, representan más fielmente la dinámica de los

procesos reales continuos (por ejemplo, la medida del tiempo mediante un reloj de manecillas). Por el contrario, las magnitudes digitales varían de modo discreto y por ello, representan de modo más artificial la dinámica de los procesos reales continuos (por ejemplo, la medida del tiempo mediante un reloj digital) (González y Sánchez, 2004).

La digitalización consiste en la transformación de un modo de medir en otro. Esta digitalización suele implicar una pérdida de información, porque al estimar el número de unidades de medida que equivalen en una magnitud analógica que queremos redondear. La magnitud analógica (el valor real) está dentro del intervalo de la unidad correspondiente de la magnitud digital, pero, hecha la transformación, no es posible saber exactamente donde se encuentra. A pesar de este problema, la digitalización tiene varias ventajas generales que la hacen necesaria en muchos campos de estudio y entre ellos, cuando se usa el análisis de imágenes. Por una parte facilita el cálculo numérico y por otra simplifica el almacenamiento y copia de la información (Pertusa, 2003).

En el campo de las imágenes, digitalizar significa convertir en cifras las coordenadas analógicas de cada punto, usando las espaciales y las espectrales. En el caso de las coordenadas espaciales, cada punto de la imagen es proyectado sobre una estructura de diminutos puntos (píxeles) o elementos sensibles a la luz, ordenados cartesianamente, los cuales están en el aparato de captación. Píxel, es la abreviatura de (*picture element*) o en castellano elemento de la imagen (Balbuena, 2006).

La resolución de una imagen digitalizada es el número de píxeles. A mayor número de píxeles, mayor resolución. Generalmente, cuanto más alto es el número de píxeles, mayor es la calidad de la imagen. En el caso de las coordenadas espectrales hablamos de intensidades de luz. Cada elemento sensible del aparato produce una intensidad de corriente proporcional a la intensidad de luz que recibe. Estos valores son llevados a una matriz de números que constituyen el resultado de la digitalización. Cada píxeles, que ocupa una coordenada espacial dentro de la matriz XY, presentará tres valores de intensidad de luz cromática, o un valor de intensidad de luz monocromática (Balbuena, 2006).

Las sustancias húmicas (SH) se dividen en los ácidos húmicos (AH), ácidos fúlvicos (AF) y huminas residuales (HR), definidas como macromoléculas orgánicas, con estructura química compleja, distinta y estable que su forma original; provienen de la degradación de residuos de plantas y animales, por la actividad enzimática de microorganismos y metamorfismo orgánico (Fründ *et al.*, 1994 y Schnitzer, 2000). Los cuales son la fracción orgánica del suelo más importante por su efecto en la ecología, estructura y fertilidad, así como en el crecimiento de las plantas (Maccarthy, 2001). Las SH se refieren a materiales derivados de la materia orgánica distribuidos en el suelo, donde las SH son un grupo complejo de alta concentración. Con base en su solubilidad, en condiciones ácidas o alcalinas, las SH se clasifican en tres fracciones (Sutton y Sposito, 2005): huminas que son insolubles, los AH que son solubles en medios alcalinos y medios ácidos ($\text{pH} > 2$) aunque no las condiciones de ácidos fuertes, si el $\text{pH} < 2$ y AF son solubles en condiciones alcalinas y ácidas. La clasificación de las tres fracciones es conceptual y no

representa tres tipos distintos de moléculas orgánicas (Hayes *et al.*, 1989), pues las SH suelen incluir un esqueleto de moléculas aromáticas alquilo con grupos funcionales, como ácidos carboxílicos, hidroxilo fenólico y grupos quinona unidos a ellos (Chen *et al.*, 2009).

Estas sustancias están presentes de forma natural en los suelos o en forma de residuos orgánicos, contribuyen en los procesos físicos directos o indirectos en el crecimiento vegetal y la adaptabilidad al medio ambiente, mejoran la estabilidad de los agregados del suelo (Piccolo y Mbagwu, 1999), absorción de nutrimentos (Pinton *et al.*, 1999; Quaggiotti *et al.*, 2004.), y metabolismo de carbono (Nardi *et al.*, 2007).

La microscopía es un método de estudio de muestras de suelo inalteradas con la ayuda de técnicas microscópicas (y a veces con los ultramicroscópicas), con el fin de identificar sus constituyentes, determina sus relaciones mutuas con el espacio y tiempo e interpretar sus condiciones de formación. Se debe de tener especial cuidado para asegurarse de que la muestra de suelo no sufra de ninguna deformación durante la fase de toma de muestras, el transporte y la obtención de las secciones delgadas, por lo que definimos la micromorfología como la técnica descriptiva de las características del suelo-muestra en un nivel microscópico, mientras que se utilizan estas características para hacer interpretaciones, por lo general en los procesos de formación del suelo.

Es casi imposible deducir la forma tridimensional de un objeto a partir de una sección delgada. Uno de los mejores ejemplos se muestra en la siguiente figura,

donde algunas de las posibles secciones procedentes de un cubo se incluyen (por ejemplo, un triángulo, un cuadrado, un rectángulo, un hexágono) (Figura 3).

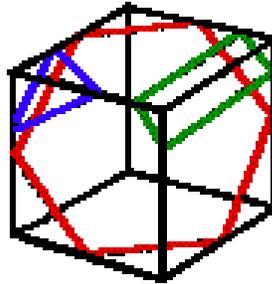


Figura 1. Posibles secciones procedentes de un cubo de suelo.

También debe tener en cuenta que la sección se observa es tangencial o subtangencial, siendo esto en muchos casos, lo que puede dar lugar a interpretaciones erróneas, por ejemplo, las secciones transversales de los canales pueden aparecer huecos ovales o esféricos y rara vez aparecen alargados (Figura 4).

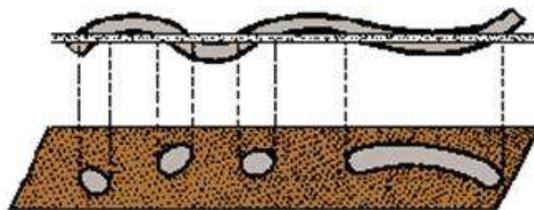


Figura 2. Posibles secciones tangenciales procedentes de un cubo de suelo.

Una sección tangencial (B) de un nódulo nucleico (a) no puede tocar el núcleo y aparecen como un nódulo típico: una sección subtangencial de un canal o de una cavidad o hipo o cuasi revestimiento (b) pueden simular la presencia de nódulos

impregnativos (B). Una sección tangencial de un recubrimiento de un canal (c) puede aparecer como un llenura (B). Las secciones (A) darían interpretaciones correctas (Figura 5).

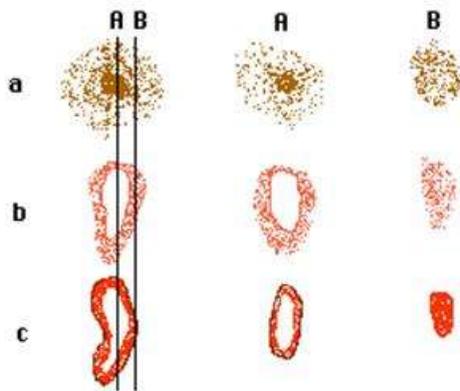


Figura 3. Secciones tangenciales.

Tampoco es probable que los granos se corten en función de su diámetro más largo, por lo que en la sección delgada, por lo general aparecen más pequeños que su tamaño real.

Sólo la sección que aparece como resultado de cortar el grano a través de su parte central muestra el diámetro real.

Por la misma razón, que casi nunca se ven granos esqueleto en contacto con otros en las secciones delgadas, ya que el punto de contacto se encuentra fuera del plano de la sección de corte en la mayoría de los casos. Un embalaje de granos de arena gruesa cerrado aparecerá en la sección delgada como un conjunto de granos aislados que están a una cierta distancia el uno del otro.

Por lo tanto las imágenes resultantes de los tratamientos aplicados al suelo, se pueden clasificar según el manual de Bullock *et al.*, 1985; Stoops, 2003, lo cual se deriva en la siguiente descripción:

a) Una serie de edaforrasgos que como unidades discretas se presentan en los suelos y son reconocibles a partir del material adyacente por una diferencia en la concentración de uno o más de sus componentes (por ejemplo, una fracción de tamaño de grano, la materia orgánica, los cristales, componentes químicos) o por una diferencia en el tejido interno. En realidad, en la mayoría de los casos, las reorganizaciones de los materiales del suelo no se pueden atribuir a una herencia del material original.

b) Una serie de revestimientos nos indican la forma del poro que se define por su composición y por la superficie que la capa, estos revisten una superficie natural del suelo: las paredes de los huecos, la superficie de los granos y de los agregados, no se superponen a la masa basal (pues no son impregnaciones) y tienen límites netos. Tienen una naturaleza variada sin embargo se puede observar un acomodo específico (Figura 6 y 7).

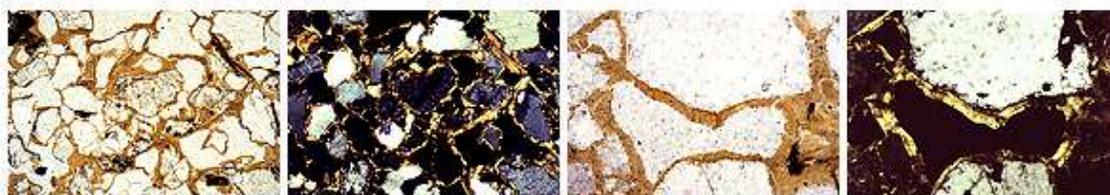


Figura 4. Revestimientos de naturaleza arcillosa.



Figura 5. Revestimientos de naturaleza orgánica.

c) Poros Llenos son huecos llenos o parcialmente llenos, con el suelo o alguna fracción de ella. En la Figura 1 y 2 se pueden distinguir un llenado denso incompleto (Figura 8).

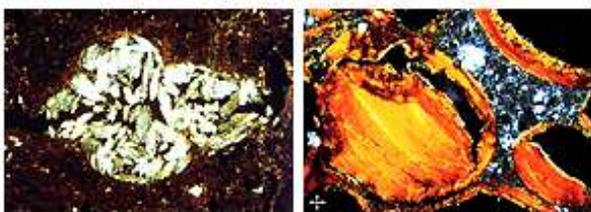


Figura 6. Llenado denso incompleto.

d) También se pueden observar intercalaciones sencillas, las cuales se presentan de manera individual, son edaforrasgos alargados, sin relación con las superficies naturales y que no consisten en cristales individuales o intercrecimientos, no son formas frecuentes en los suelos.

El análisis de imagen se basa principalmente en la obtención y fabricación de monolitos (Bourrier, 1965) de suelo no alterado, para lo cual considera tres criterios esenciales antes del tratamiento de la imagen:

1. La conservación de la estructura original del suelo, cualquiera que sea la naturaleza del material y su humedad.

2. La posibilidad de realizar cortes verticales u horizontales de gran tamaño, con la finalidad de acrecentar al máximo el campo de observación.
3. La homogeneidad perfecta de la superficie del bloque para su análisis.

La estructura del suelo, composición, propiedades de agregación, contenido de materia orgánica, tamaño de partícula, distribución de poros y propiedades químicas, se ven afectadas por el manejo agronómico que se le dé (Chen *et al.* 2009).

La digitalización de las muestras de suelo tiene ventajas generales que la hacen necesaria en muchos campos de estudio, ello facilita el cálculo numérico y simplifica el almacenamiento de la información; la interpretación de imágenes monocromáticas permite diferenciar el material sólido del vacío existente en el suelo, ello facilita la descripción de la porosidad y su organización espacial (González y Sánchez, 2004).

La segmentación de un área específica en una imagen digitalizada, genera valores de porosidad cercanos a la imagen real del perfil del suelo, los errores al momento de calcular el total de poros en el área no debe de ser mayor del 4 % (Wang *et al.* 2011).

Los resultados obtenidos concuerdan con Skvortsova y Rozhkov (2010), indican que en suelos calcáreos las diferencias morfológicas y arreglo geométrico entre poros son relativamente pequeñas, sin embargo cuando se encuentra en el suelo una fracción húmica en la orientación vertical del horizonte, se denota una tendencia de arreglo hacia la agregación o generación de macro poros.

La evolución de la materia orgánica es observada en los cortes, resulta en la morfología del poro, ya que se mantiene con fronteras concretas dentro del material mineral, por lo tanto, sería la incorporación y tasas de descomposición de la materia orgánica que controla el funcionamiento, formación y estabilización de agregados, como se observa por Jastrow y Miller (1997), en un sistema con un suministro regular de materia orgánica, los agregados se desarrollarían de acuerdo con el modelo de Six *et al.* (2000). Del mismo modo, Huang *et al.* (2010) mostraron que el suministro de materia orgánica promueve la formación de microagregados dentro de macroagregados, que conduce a la estabilización del suelo.

La evidencia morfológica de la importancia del suministro de materia orgánica en ambientes y: suelos con insumos orgánicos, tienden a formar agregados estables, que a su vez podrían proteger la materia orgánica nativa del suelo de la descomposición, dando lugar a una mayor estabilización agregada. Esto está de acuerdo con Alvaro-Fuentes *et al.* (2009), Fernandez-Ugalde *et al.* (2009) y Xi *et al.* (2010), quienes encontraron que la siembra directa promueve la acumulación de materia orgánica en los microagregados y una mejor estructura. Sin embargo, en los suelos degradados por la erosión, compactación, monocultivos, conduce a una mayor pérdida de la materia orgánica y una mayor desestabilización de los agregados (Jastrow y Miller, 1997).

I. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Ubicación del Área Experimental

El estudio se llevó a cabo en el vivero de planta nativa de las instalaciones de la Facultad de Agronomía de la Universidad Autónoma de Nuevo León. El clima predominante en el área es semiseco muy cálido con lluvia en verano. Las temperaturas medias oscilan entre 14.7 °C en el mes de enero y 22.3 °C en el mes de agosto. Los meses más cálidos son junio, julio y agosto, con una temperatura media mensual que oscila entre 27 y 28 °C y el mes más frío es enero, con una temperatura media menor de 15 °C, sin embargo, es común observar en el verano (junio-agosto) temperaturas máximas extremas de 44 °C y en el invierno (enero-marzo) las heladas llegan a los -3 °C. La precipitación anual de ésta región fluctúa de 700 a 1200 mm. El máximo régimen pluvial mensual se registra en septiembre con promedio de 160 a 170 mm y el mínimo de 10 a 15 mm se presenta en marzo.

3.2 Manejo del cultivo

Las plantas se trasplantaron el mes de mayo, como plántulas de chile jalapeño (*Capsicum annuum* L. var. M) en macetas que contenían 10 kg⁻¹ de suelo de un horizonte Ap 0-30 cm, la fertilización química se realizó de acuerdo a los lineamientos de la solución nutritiva balanceada, como procedimiento Steiner. La fórmula para el fertirriego de este cultivar está tomada en base a un cultivo de chile jalapeño, adaptado a climas cálidos y con tolerancia a la sequía.

Se manejó un diseño experimental completamente al azar, efectuándose dos diferentes niveles de aplicación de AH y AF con 2 y 6 mL L⁻¹, una solución nutritiva

sin hierro y sin calcio, (SNs/Fe y SNs/Ca, SNC) y solución nutritiva completa (Testigo), los tratamientos fueron ajustados a pH (6 y 7) (Cuadro 1).

Cuadro 1. Distribución de tratamientos para chile jalapeño.

| Trat | Chile Jalapeño | |
|------|------------------------------|------------------------------|
| | pH 6 | pH 7 |
| 1 | AF + Ca 2 mL L ⁻¹ | AF + Ca 2 mL L ⁻¹ |
| 2 | AF + Ca 6 mL L ⁻¹ | AF + Ca 6 mL L ⁻¹ |
| 3 | AH + Fe 2 mL L ⁻¹ | AH + Fe 2 mL L ⁻¹ |
| 4 | AH + Fe 6 mL L ⁻¹ | AH + Fe 6 mL L ⁻¹ |
| 5 | SNs/Fe | SNs/Fe |
| 6 | SNs/Ca | SNs/Ca |
| 7 | SNC | SNC |

AF. Ácidos Fúlvicos; AH. Ácidos Húmicos; SNs/Ca. Solución Nutritiva sin Calcio; SNs/Fe. Solución Nutritiva sin Hierro; SNC. Solución Nutritiva Completa.

3.3 Obtención de muestra

Terminado el ciclo productivo del cultivar, se llevó a cabo la obtención de la muestra de suelo no alterado, donde se utilizó la siguiente metodología:

Se eliminó el vástago de la planta y se dejó secar el suelo dentro de la maceta por 72 h a cielo abierto.

Concluida la etapa anterior, se procedió a eliminar la maceta con una esmeriladora angular (disco de 1/2", 2000 watts 18 amps. Makita mga700); con el uso del mismo esmeril se eliminó el suelo contenido en el recipiente plástico, haciendo el corte lo más fino y rápido posible para obtener un cubo de 10 x 10 x 25 cm, se cubrió con papel aluminio y cartón para evitar alterar la muestra, se cortó la muestra por la base y se transportó el prisma obtenido al laboratorio para la obtención de monolitos mediante la impregnación de las muestras.

3.4 Impregnación de resina y solidificación de la muestra

Se preparó una resina líquida (cristal 00-10-14, Plastiformas de México SA de CV.) de poliestireno insaturado al 80 % (2400 mL), se utilizó acetona (CH_3COCH_3) como solvente para la mezcla 20 % (600 mL) y un catalizador (Etil-metil-cetona, 4 gotas L^{-1}) es un peróxido orgánico, esta mezcla fue aplicada a las muestras en 10 ocasiones con una diferencia de tiempo de aplicación de 72 h. La resina se aplicó de manera lenta, esto con el fin de que esta no se derramara por los lados, ello permitió la solidificación de la muestra para su posterior análisis de porosidad.

3.5 Cuantificación de porosidad por análisis de imagen

Una vez solidificada la muestra (lo cual duro varios días dependiendo de la temperatura ambiente y la presencia de sol), se realizó un corte vertical por el centro de la maceta y dos más a 3 cm del primer corte a cada ejemplar de suelo, se tomó una muestra de dimensiones de 2.5 x 2.5 cm en el rango 0-5 cm, enseguida se pulió usando una lija de tipo Fandeli A99 Hoja de Agua 9x11 cm la superficie de cada sección, hasta obtener la homogeneidad perfecta de la superficie del bloque para su análisis.

3.6 Análisis de Imagen

Para poder determinar macroporos el corte se puso sobre la escala, a esta se le coloca una cámara digital Sony Alpha DSLRA350K 24 MP Digital SLR CCD con una resolución de Macro Sony 50 mm, la cual sirve para digitalizar los cortes que se realizaron a cada uno de los cubos de suelo. Posterior a la preparación y digitalización de las muestras las imágenes son procesadas en la computadora para poder cuantificar el tamaño y forma de los espacios vacíos existentes sobre la superficie de los cortes seleccionados bajo un programa computacional Image Pro-Plus[®] V6.0 (Media Cibernética Maryland, USA).

Dicho programa, se fundamenta en la identificación y determinación automática del número total de objetos que configuran una imagen. Para conseguir la información de las diversas medidas que tienen los cortes de suelo, el sistema debe ser calibrado, ya que es un componente primordial en el proceso de análisis de imagen y en la precisión de la información obtenida. Para calibrar el programa, se

requiere de una cuadrícula milimétrica de tamaño conocido. Tras la adquisición y proceso de la imagen de calibración, el sistema transforma las medidas reales de las coordenadas «X» e «Y» de la cuadrícula introducidas por el operario, en unidades de píxeles. En la cual se digitalizan las imágenes iluminadas para convertirlas en imágenes binarias para lo cual se tienen que anexar al programa Image Pro-Plus® los datos correctos de la escalas obtenida de cada imagen, si los datos son incorrectos entonces el programa no cuantifica la porosidad existente en las muestras de suelo hasta que sean corregidos.

De acuerdo al procesamiento de las imágenes es difícil de establecer un análisis estadístico pues estas son tomas y cortes de muestras de suelo lo cual no nos permite tener la abundancia de repeticiones que son requeridas en un análisis estadístico, donde la base de información que se reportara es en base a muestras por tratamiento con su respectiva impregnación de las resinas y su digitalización para su interpretación.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos en los tratamientos con pH 6 sobre la porosidad total de las muestras de suelo (Cuadro 2), muestran que el tratamiento SNC (3.87 mm^2) fue superada por el resto de los tratamientos donde el tratamiento AF + Fe 2 mL L^{-1} lo supero en un 519% (20.16 mm^2), seguido por el tratamiento AF + Fe 6 mL L^{-1} en un 327% (12.71 mm^2), AH + Ca 2 mL L^{-1} 287% (11.15 mm^2)y AH + Ca 6 mL L^{-1} 157 % (6.11 mm^2) y finalmente los tratamientos SNs/Fe (3.48 mm^2) y SNs/Ca (3.26 mm^2) con un 89 y 84 % respectivamente.

Mediante el proceso de binarización de imagen (Figura 1), mostrando los poros en color negro y el material mineral en color blanco, en el área total se cuantificaron los macro poros, por lo que a simple vista se aprecia una estructura de agregación que se genero con el uso de los diferentes tratamientos con pH 6, el tratamiento AF + Fe 2 mL L^{-1} se cuantifico con la mayor agregación de poros correspondientes a rangos mayores y menores a 1 mm^2 ; los materiales orgánicos mezclados con el compuesto inorgánico mostraron la mayor cantidad de agregados que aquellos tratamientos que solo se les incorporo la fertilización química.

Cuadro 2. Porosidad total de la muestras con pH 6 en mm².

| Tratamientos pH 6 | Área total mm ² |
|------------------------------|----------------------------|
| AF + Fe 2 mL L ⁻¹ | 20.16 |
| AF + Fe 6 mL L ⁻¹ | 12.71 |
| AH + Ca 2 mL L ⁻¹ | 11.15 |
| AH + Ca 6 mL L ⁻¹ | 6.11 |
| SNs/Fe | 3.48 |
| SNs/Ca | 3.26 |
| SNC | 3.87 |

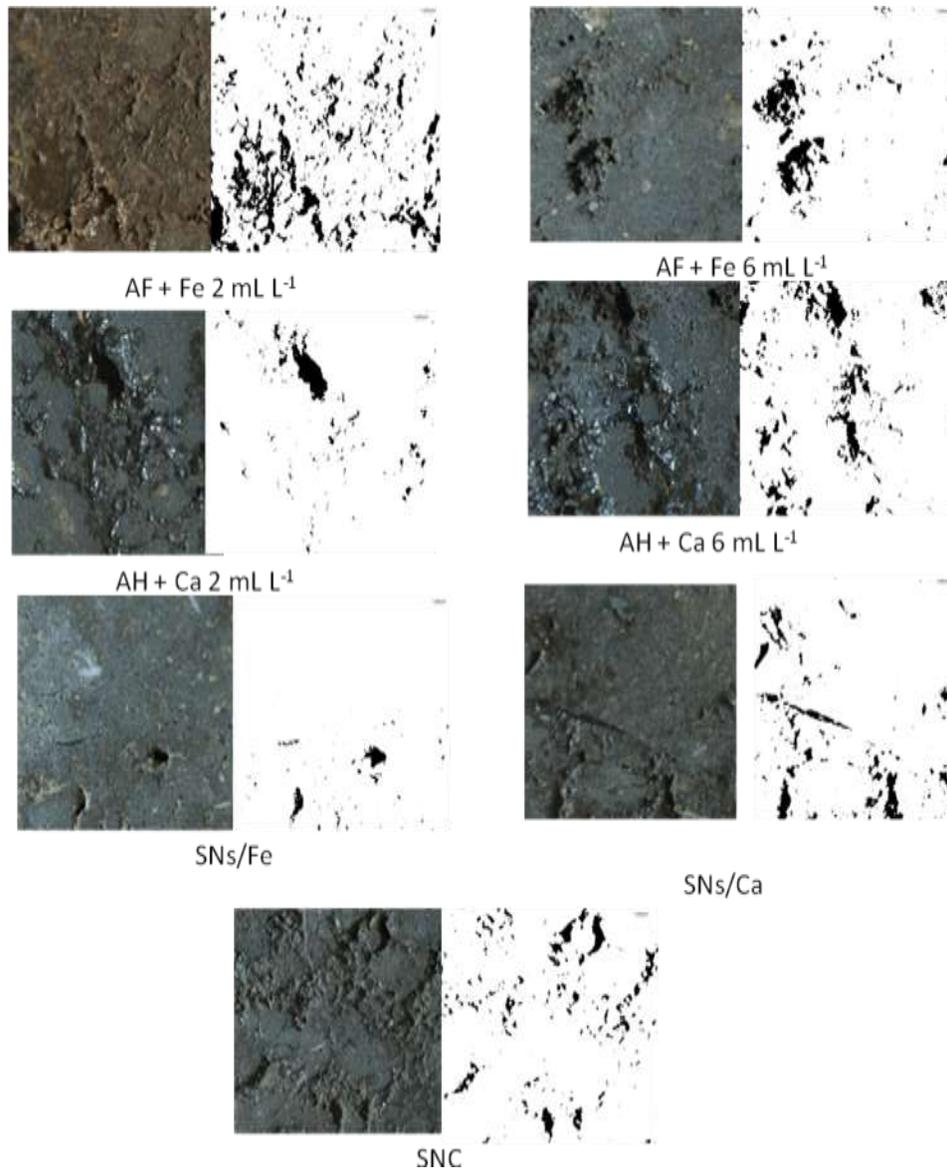


Figura 7. Imagen original y binaria para obtener porosidad total de la muestras de suelo 2.5x2.5 a un pH 6

Con respecto a los tratamientos a pH 7 se pudo observar y corroborar que el tratamiento de AF + Fe 2 mL L⁻¹ obtuvo la mayor área con 2.41 mm² lo cual es congruente con el mismo tratamiento a pH de 6, sin embargo por la condición de manejo del método y la manipulación de fotografía los valores fueron mas bajos en esta ocasión, el tratamiento que siguió con el mismo valor fue el de AH + Ca 2 mL L⁻¹ con 2.41 mm². Los tratamientos que realmente no mostraron un efecto contundente estuvieron vinculados a las aplicaciones químicas como SNs/Ca (0.00097785 mm²) en este caso el área real no fue detectada por algún problema de error experimental en la calibración del método en las coordenadas "X" "Y", SNC (0.61 mm²), SNs/Fe (0.31 mm²), donde las imágenes lo que muestran es una porosidad mínima y dispersa. Generadas las imágenes binarias (Figura 2), podemos observar que los poros en estos tratamientos se encuentran dispersos en las muestras analizadas, esto genera una menor estabilidad en la agregación del suelo.

Cuadro 3. Porosidad total de la muestras pH 7 en mm².

| Tratamientos pH 7 | Área total mm ² |
|------------------------------|----------------------------|
| AF + Fe 2 mL L ⁻¹ | 2.41 |
| AF + Fe 6 mL L ⁻¹ | 0.61 |
| AH + Ca 2 mL L ⁻¹ | 2.41 |
| AH + Ca 6 mL L ⁻¹ | 0.78 |
| SNs/Fe | 0.31 |
| SNs/Ca | 0.00097785 |
| SNC | 0.61 |

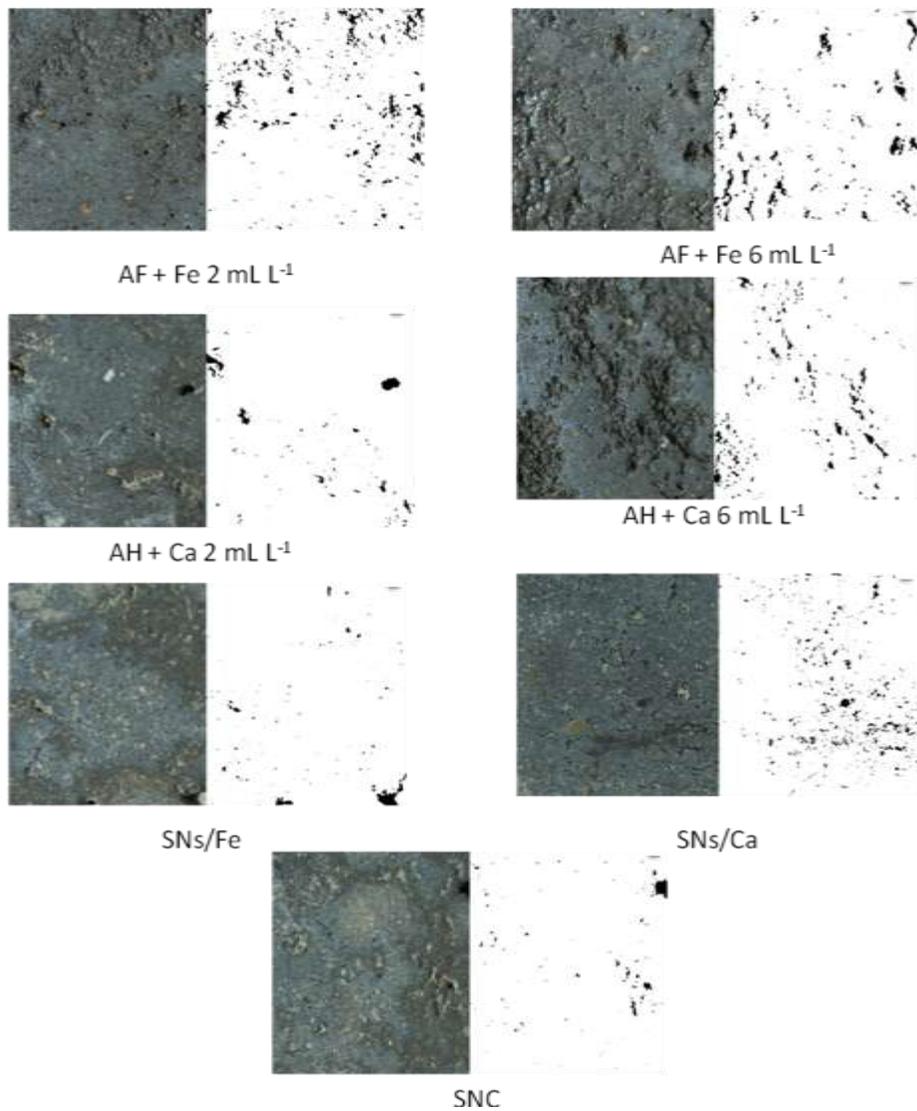


Figura 8. Imagen original y binaria de porosidad total de la muestras pH 7.

Kay (1997) indica que los macroporos son inestables a menos que el proceso de creación del poro aumente sustancialmente el contenido de materia orgánica de la pared de los poros, como es el caso con canales de raíces. En nuestro caso, los macroagregados visibles fueron los tratamientos con las mezclas orgánico-minerales ya que tienen una superficie específica mayor, esto está de acuerdo con las observaciones de Jastrow y Miller (1997) y Angers y Chenu (1997). Los análisis de las aéreas totales sugirieron que un contenido de AF + Fe y AH + Ca 2 mL L⁻¹

mantiene el tamaño de los agregados. Las observaciones indican que el proceso de degradación fue controlado por fisuración de grandes agregados (migas o bloques subangulares), lo que no significa el colapso de huecos intrapedal embalaje o bioporos, que se mantuvo en agregados más pequeños. En nuestro caso, el almacenamiento de la materia orgánica fue mas eficaz en los agregados en el horizonte mas cercano a la superficie del suelo y de acuerdo a las imágenes obtenidas estos son más estables. Cualquier alteración física de los suelos pueden romper los agregados, lo que implica pérdidas de porosidad pero no de material húmico, lo que generaría una nueva formación de poros. Los resultados del análisis de imagen mostraron que hubo una mayor interface de los compuestos órgano - minerales con respecto al material mineral nativo ya que el tamaño de los agregados aumenta y solo con la incorporación de los tratamientos minerales el tamaño del poro disminuye, donde la estructura del suelo describe la disposición de las partes sólidas y del espacio de los poros que están entre ellas. El tamaño del área representa el agregado y su forma son la distinción como base para la clasificación, también describe la manera en que se agregan las partículas, los macro poros cuantificados en el presente estudio representan una inter agregación generada por el impacto antropogénicos de los tratamientos adicionados.

V. CONCLUSIONES

Las secciones tangenciales efectuadas a las muestras en los tratamientos aplicados a pH 6 muestran revestimientos arcillosos agrupados densos y profundos lo que denota la presencia de agregación por la materia orgánica; a diferencia de los tratamientos a pH7 que exponen un arquetipo no profundo, disperso y una estructura compleja solida esto indica que la presencia del material organico no realizo la función de agregación con respecto a las muestras digitalizadas a pH 6. Lo anterior es reconociendo que la muestra de suelo proviene de una colecta disturbada donde se destruyo parte de las condiciones naturales que dicho suelo contenía.

La imagen digitalizada muestra la evidencia de los poros con tonalidades oscuras y se pueden observar los tratamientos AF + Fe 2 mL L⁻¹ y el AF + Fe 6 mL L⁻¹ que mostraron de acuerdo a las áreas cuantificadas ser los mas adecuadas permitiendo una mayor agregación de las partículas de suelo, donde el grado máximo de generación de macro poros o agregados se puede observar en la parte superior del horizonte, pues el impacto de los tratamientos es más pronunciado, por lo tanto se acepta la hipótesis de trabajo planteada en la cual se establecen estos conceptos.

La utilización de resina epoxica permite mantener una mejor condición física de las muestras permitiendo obtener cortes donde se observan los poros que se encuentran en el suelo con esta imagen es posible identificar estructuras específicas para generar un criterio de resultados aceptables con un mínimo de error.

VI. LITERATURA CITADA

- Alvaro-Fuentes, J., Cantero-Martinez, C., L'opez, M. V., Paustian, K., Deneff, K., Stewart, C. E. and Arr'ue, J. L. 2009. Soil aggregation and soil organic carbon stabilization: Effects of management in semiarid Mediterranean agroecosystems. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **73**: 1519–1529.
- Andronikov, V. L., Lebedeva, I. I., Tonkonogov, V. D. and Pankova, E. I. 1989. "Problems in the Anthropogenic Evolution of Soil Cover of the Soviet Union," in *Anthropogenic and Natural Evolution of Soils and Soil Cover*, pp. 5–6 - I. I.
- Angers, D. A. and Chenu, C. 1997. Dynamics of soil aggregation and C sequestration. In Lal, R., Kimble, J. M., Follett, R. F. and Stewart, B. A. (eds.) *Soil Processes and the Carbon Cycle*. CRC Press, Boca Raton, USA. pp. 199–208.
- Ballarol, W. M. 2002. [En línea] Métodos Analíticos. http://www.si.edu/scmre/about/analytical_methods_spanish.htm (consulta febrero 3 de 2006).
- Balbuena, J. A. 2006 [En línea] Técnicas de Análisis de Imagen. <http://www.uv.es/balbuena/tai/tai.html> (consulta 13 de abril de 2006).
- Baver, I. D., Gardner, W. H. y Gardner, W. R. 1980. Física de Suelos. Editorial UTEHA, México. Pág. 196-204.
- Bullock, P. Fedoroff, N., Jongerius, A. y Stoops, T. 1985. ISSS "Handbook for Soil Thin Sección Descripción" Stoops, G. Laboratorium voor Mineralogie, Petrologie

en Micropedologie, Geologisch Instituut, Universiteit Gent, Krijgslaan 281, S8,
B-9000 Gent, Bélgica

Blagovidov, N. L. 1954 "Development of Podzolic Soils," Pochvovedenie, No. 2, 46–
60.

Bouma, j., Jongerius, A., Boersma, O., Jager, A., Schoonderbeek, D. 1977. The
function of different types of macropores during saturated flow through four
swelling soil horizons. Soil Sci. Soc. Am. J. 41: 945-950.

Bouma, J., Jongerius, A., Schoonderbeek, D. 1979. Calculation of saturated
hydraulic conductivity of some pedal clay soils using micromorphometric data.
Soil Sci. Soc. Am. J. 43: 261-264.,

Bronick, C. J., Lal, R. 2005. Soil structure and management: a review. Geoderma,
124: 3-22..

Buckman y Brady, 1991. Naturaleza y Propiedades de los Suelos. Edición 4^{ta}.
México Editorial UTEHA - Grupo Noriega. Pp 57 – 59.

Burés, S. 1997. Editorial Agrotecnica S, S. L. Madrid. 1^{er}. Edición, pp. 69-70.

Chen, H., Berndtsson, R., Ma, M. and Zhu, K. 2009. Characterization of insolubilized
humic acid and its sorption behaviors. Environ Geol 57:1847–1853.

Clark, J. G. and Stephen, H. A. 2002. "Computed Tomographic Measurement of
Macroporosity in Chisel-Disk and No-Tillage Seedbeds," Soil Tillage Res. **64** (1–
2), 101–111.

- Dobrovolskii, G. V. 1988. "Micromorphological Control of the Development and Cultivation of Soddy-Podzolic Soils," in *Micromorphology of Anthropogenically Modified Soils* (Nauka, Moscow, 1988), pp. 31–36.
- Donrrroso, C. 2003. Introducción a la Edafología, Departamento de Edafología Química Agrícola. Unidad Docente e Investigador De la Facultad de Ciencias. Universidad de Granada España.
- Fernandez-Ugalde, O., Virto, I., Bescansa, P., Imaz, M. J., Enrique, A. and Karlen, D. L. 2009. No-tillage improvement of soil physical quality in calcareous, degradation-prone, semiarid soils. ***Soil Till. Res.* 106: 29–35.**
- Fitzpatrick, E. A. 1987. Suelos su Formación, Clasificación y Distribución. Edición 3^{re}. México. Editorial CEESA. Pág. 47-48-49- 53.
- Fründ, R.; K., K. Guggenberger; H. Haider; I. Knicker; H. -D. Kögel-Knaber; J. Lüdeman; W. Luster; Zech And M. Spiteller. 1994. Recent advances in the spectroscopic characterization of soil humic substances and their ecological relevance. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk*, 157: 175-186.
- García, N. 2005 [En línea] Propiedades del Suelo, Propiedades Físicas, Porosidad. <http://www.unex.es/edafo/ECAP/ECAL5PFPorosidad.htm>.
- González, C. G. 1995. La Compactación en Huertos de Nogal Pecanero. Tercer Simposiom Internacional Nogalero (NOGATEC). Torreón.

- González, C. G. y Sánchez, I. C. 2004. Morfología de los poros de circulación preferencial del agua en el suelo mediante técnicas de análisis de imagen. *Ingeniería Hidráulica de México*. Vol. XIX, No. 3. Pág.15
- Hayes, M. H. B., MacCarthy, P., Malcolm, R. L. and Swift, R. S. 1989. The search for structure: setting the scene. In *Humic Substances II: In Search of Structure*; EdsWiley New York, pp 3–31.
- Huang, S., Peng, X., Huang, Q. and Zhang, W. 2010. Soil aggregation and organic carbon fractions affected by long-term fertilization in a red soil of subtropical China. *Geoderma*. 154: 364–369.
- Jastrow, J. D. and Miller, R. M. 1997. Soil aggregate stabilization and carbon sequestration: Feedbacks through organomineral associations. *In* Lal, R., Kimble, J. M., Follett, R. F. and Stewart, B. A. (eds.) *Soil Processes and the Carbon Cycle*. CRC Press, Boca Raton, USA. pp. 207–224.
- Kay, B. D. 1997. Soil structure and organic carbon: A review. *In* Lal, R., Kimble, J. M., Follett, R. F. and Stewart, B. A. (eds.) *Soil Processes and the Carbon Cycle*. CRC Press, Boca Raton, USA. pp. 169–198.
- Lebedeva, E. I. Pankova, V. D. Tonkonogov, and M. B. Shapiro, “General and Regional Aspects of Anthropogenic Evolution of Soil Cover in the USSR,” in *Genesis, Anthropogenic Evolution, and Rational Use of Soils* (Moscow, 1989), pp. 3–10.

- López, M., J. Porta., A. C. Roquero. 1994. Edafología, para la Agricultura y el Medio Ambiente. Edición 1^{er}. Editorial Mundi-Prensa. Pág. 77-78.
- Lebedeva, M. P. and Gerasimova, M. I. 2009. "Micromorphology of Diagnostic Horizons in Aridic Soils (Complementary to the New Classification System of Soils of Russia)," *Eur. Soil Sci.* **42** (13), 1427–1434.
- Maccarthy, P. 2001. The principles of humic substances. *Soil Science*. 166:738-751.
- Martínez, N. Á, y A. Sanpedro. 1995. Introducción al Proceso Digital de Imágenes. Técnicas de Fluorescencia en Microscopia y Citometria. Universidad de Oviedo servicio de publicaciones. Vol. 3 Núm. 5. Pág. 10-15, España.
- Meien, S. V. and. Shreider, Yu. A. 1976. "Methodological Aspects of the Theory of Classification," *Vopr. Filos.*, No. 12, 67–79.
- Nardi, S., Muscolo, A., Vaccaro, S., Baiano, S., Spaccini, R. and Piccolo, A. 2007. Relationship between molecular characteristics of soil humic fractions and glycolytic pathway and Krebs cycle in maize seedlings. *Soil Biol Biochem* 39:3138–3146.
- Narro, F. E. 1994. Física de suelos, con enfoque agrícola. Editorial trillas. Edición 1^{er}. México. Pág. 51 - 52.
- Pagliai, M., La Mace, M., Lucamante, G. 1983. Micromorphometric and micromorphological investigations of a clay loam soil in viticulture under zero and conventional tillage. *J. Soil Sci.* 34: 391-403..

- Pagliai, M., Marsili, A., Servadio, P., Vignozzi, N., Pellegrini, S. 2003. Changes in some physical properties of clay soil in central Italy following the passage of rubber tracked and wheeled tractors of medium power. *Soil Till. Res.* 73: 119-129.
- Pagliai, M., Vignozzi, N., Pellegrini, S. 2004. Soil structure and the effect of management practices. *Soil Till. Res.* 79: 131-143..
- Panova, N. S. and Shreier, Yu. A. 1975. "The Principle of Duality in the Theory of Classification," *NTI, Ser. 2., No. 10*, 3–10.
- Parfenova, E. I. and Yarilova, E. A. 1977. *Handbook on the Micromorphological Analysis in Soil Science* (Nauka, Moscow, 1977) - R. Brewer, *Fabric and Mineral Analysis of Soils* (J. Wiley and Sons, New York, 1964).
- Pertusa, J. F. 2003. [En línea] Técnicas de Análisis de Imagen. <http://www.agapea.com/Tecnicas-de-analisis-de-imagen-n45417i.htm>.
- Piccolo, A. and Mbagwu, J. S. C. 1999. Role of hydrophobic components of soil organic matter in soil aggregate stability. *Soil Sci Soc Am J* 63:1801–1810.
- Pinton, R., Cesco, S., Iacoletti, G., Astol, W. S. and Varanini, Z. 1999. Modulation of NO_3^- uptake by water-extractable humic substances: involvement of root plasma membrane H^+ -ATPase. *Plant Soil* 215:155–161.
- Quaggiotti S, B Rupert, D Pizzeghello, O Francioso, V Tugnoli and S Nardi (2004) Effect of low molecular size humic substances on nitrate uptake and expression

of genes involved in nitrate transport in maize (*Zea mays* L.). *J Exp Bot* 55:803–813.

Ringrose-Voase, A.J. and P. Bullock. 1984. The automatic recognition and measurement of soil pore types by image analysis and computer programs. *J. Soil Sci.* 35:673–684.

Rozhkov, V. A. 2009, “Tectology of Soil Megasytems: Universal Principles of Organization and Analysis of Data,” *Pochvovedenie*, No. 10, 1155–1164. *Eur. Soil Sci.* 42 (10), 1073–1082.

SAGARPA. 2004. [En línea] Sistema de Información Agropecuaria de Consulta. Disponible: <http://siea.sagarpa.gob.mx>.

Sanzharova, 1988. Extended Abstract of Candidate’s Dissertation in Biology.

Schnitzer, M. 2000. Life Time Perspective on the Chemistry of Soil Organic Matter. D. L. Sparks (Ed.). *Advances in Agronomy*, Academic Press. 98: 3-58.

Shishov, L. L., Durmanov, D. N., Karmanov, I. I. and Efremov, V. V. 1991. *Theoretical Principles and Methods of Regulating the Fertility of Soils* (Agropromizdat, Moscow, 1991)

Shaxson, T. F. y Barber, R. G. 2003. Optimizing soil moisture for plant production; the significance of soil porosity. FAO, Roma, Italy.

Six, J., Elliott, E. T., Paustian, K., Doran, J. W. 1998. Aggregation and soil organic matter accumulation in cultivated and native grassland soils. *Soil Science Society of America Journal*, 62: 1367-1377.

- Six, J., Elliott, E. T. and 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., Feller, C., Denef, K., Ogle, S. M. 2002. Soil organic matter, biota and aggregation in temperate and tropical soils - Effect of no-tillage. *Agronomie*, 22: 755-775.
- Steiner, A. 1961. A universal method for preparing nutrient solutions of a certain desired composition. Horticultural Experiment Station, Naaldwijk, Netherlands Plant and Soil XV, no. 2.
- Stengel, P. 1997. Utilisation de l'analyse des systèmes de porosité pour la caractérisation de l'état physique du sol in situ. *Ann. Agron.* Vol. 30, nùm. 1, pp. 27-51.
- Stoops, G. 2003. Guidelines for Analysis and Description of Soil and Regolith Thin Sections. Soil Science Society of America, Madison, USA.
- Sutton, R. and Sposito, G. 2005. Molecular structure in soil humic substance: new view. *Environ Sci Technol* 39(23):9009–9016.
- Verba, M. P., Poznyak, S. P. and Skvortsova E. B. 2003. "Fabrics of Irrigation Crusts on Irrigated Chernozems," in *Geneza, Geografiya ta Ekologiya Gruntiv* (L'viv, 2003), pp. 41–44- (A. D. Voronin, *Structural–Functional Hydrophysics of Soils* (Izd. Mosk. Gos. Univ., Moscow, 1984).
- Voronin D.V 1984 *Fiz. Gorenia I Vzryva* V.20, No 4.

Wang, Q., Luo, J., Zhong, Z., Borgna, A. 2011. CO₂ capture by solid adsorbents and their applications: current status and new trends. *Energy Environ. Sci.* 4, 42–55.

Xi, X. M., Li, X. G., Long, R. J., Singh, B. P., Li, Z. T. and Li, F. M. 2010. Dynamics of soil organic carbon and nitrogen associated with physically separated fractions in a grassland-cultivation sequence in the Qinghai-Tibetan Plateau. *Biol. Fert. Soils.* 46: 103–111.

Comportamiento de un Humato de Calcio y Fulvato de Hierro en la Porosidad de un Calcisol

Rubén López Salazar*., Rigoberto E. Vázquez Alvarado**, Emilio Olivares Sáenz***, Juan A. Vidales Contreras****, Roberto Carranza de la Rosa***, Manuel Ortega Escobar*****.

RESUMEN

Los ácidos húmicos, y fúlvicos, definidos como macromoléculas orgánicas, con estructura química compleja, distinta y estable que su forma original, contribuyen en los procesos físicos directos o indirectos en la estabilidad de los agregados del suelo, por lo que implementar una técnica de impregnación con resina permite la cuantificación de la agregación del suelo en muestras sin disturbar es esencial en conservar su estructura original, la posibilidad de realizar cortes verticales u horizontales y homogeneidad perfecta de la superficie del bloque para su análisis por medios digitales, los tratamientos AF + Ca 2 mL L⁻¹ pH 6 y AF + Ca 2 mL L⁻¹ pH 7 resultaron en la agregación superior al resto de los tratamientos.

Palabras clave: ácidos orgánicos enriquecidos con calcio y hierro, porosidad, análisis de imagen.

INTRODUCCION

Las sustancias húmicas (SH) se dividen en los ácidos húmicos (AH), ácidos fúlvicos (AF) y huminas residuales (HR), definidas como macromoléculas orgánicas, con estructura química compleja, distinta y estable que su forma original; provienen de la degradación de residuos de plantas

ABSTRACT

Humic acids and fulvic acids, defined as organic macromolecules with complex chemical structure, distinct and stable than their original form, physical processes contribute directly or indirectly on the stability of soil aggregates, thus implementing a resin impregnation technique allows quantification of soil aggregation undisturbed samples is essential to retain its original structure, the possibility of vertical or horizontal cuts and perfect homogeneity of the block surface for analysis by digital means, treatments AF + Ca 2 mL L⁻¹ pH 6 and AF + Ca 2 mL L⁻¹ pH 7 aggregation resulted in superior to other treatments.

Keywords: organic acids enriched with calcium and iron, porosity, image analysis

y animales, por la actividad enzimática de microorganismos y metamorfismo orgánico (Fründ *et al.*, 1994 y Schnitzer, 2000); son la fracción orgánica del suelo más importante por su efecto en la ecología, estructura y fertilidad, así como en el crecimiento de las plantas (Maccarthy, 2001). Las SH se refieren a materiales derivados de la materia orgánica distribuidos en el suelo, donde las SH son

*Estudiante del Doctorado en Ciencias Agrícolas. Subdirección de Estudios de Posgrado. Facultad de Agronomía. U.A.N.L.

e-mail:rlsmorris@hotmail.com

**Asesor. Profesor Investigador. Facultad de Agronomía. U.A.N.L.

***Coasesor. Profesor Investigador. Facultad de Agronomía. UANL

****Coasesor Externo. Profesor Investigador del Colegio de Posgraduados. Texcoco. EdoMéx.

un grupo complejo de alta concentración. Con base en su solubilidad, en condiciones ácidas o alcalinas, las SH se clasifican en tres fracciones (Sutton y Sposito, 2005): huminas que son insolubles, los AH son solubles en medios alcalinos y medios ácidos ($\text{pH} > 2$) aunque no las condiciones de ácidos fuertes, si el $\text{pH} < 2$ y AF solubles en condiciones alcalinas y ácidas (Hayes *et al.*, 1989), las SH suelen incluir un esqueleto de moléculas aromáticas alquilo con grupos funcionales, como ácidos carboxílicos, hidroxilo fenólico y grupos quinona unidos a ellos (Chen *et al.*, 2009). Estas sustancias están presentes de forma natural en los suelos o en forma de residuos orgánicos, contribuyen en los procesos físicos directos o indirectos en el crecimiento vegetal y la adaptabilidad al medio ambiente, mejoran la estabilidad de los agregados del suelo (Piccolo y Mbagwu, 1999), absorción de nutrimentos (Pinton *et al.*, 1999; Quaggiotti *et al.*, 2004.), y metabolismo de carbono (Nardi *et al.*, 2007).

Los humatos son modificaciones de las partidas orgánicas de la materia prima inicial en su producción debido a una serie de procesos tales como la ruptura de las interacciones órgano-minerales, hidrólisis y oxidación, a pesar de estos cambios siguen perteneciendo a los compuestos húmicos donde su configuración ha cambiado, lo que les permite ser activados, estos tienen efectos fisiológicos en las plantas como mitigadores en efecto de respiración lo que tiene efecto en las síntesis de proteínas que afectan las reacciones metabólicas que actúan como sustancias de tipo hormonal (MacCarthy *et al.*, 1990).

Una forma prometedora para mejorar la calidad de los sorbentes húmicos consiste en su combinación con compuestos inorgánicos, la aplicación de AH como una enmienda orgánica del suelo en combinación con otros materiales, resulta en un aumento significativo en el crecimiento de la planta y rendimiento de los cultivos, mediante la mejora de las propiedades hidrofísicas y disponibilidad de nutrimentos de los suelos. Los complejos órgano-minerales permiten a las plantas superar los efectos adversos de la salinidad del suelo, mejora la agregación, aireación, permeabilidad, capacidad de retención de agua, absorción de micronutrientes y disponibilidad, y la disminución de la absorción de algunos elementos tóxicos (Ryabova, 2010).

Diferentes humatos, han mostrado mejorar el crecimiento y desarrollo de las plantas, aumentando la resistencia de estas a condiciones ambientales desfavorables, y actuar de manera similar a las SH naturales (Mbagwu *et al.*, 1997; Piccolo *et al.*, 1997). En campo y laboratorio con diferentes pruebas y especies de cultivos, han demostrado que

los humatos de sodio, potasio y amoníaco, estimulan significativamente la germinación de las semillas y crecimiento de las plantas (Ulanov, 1993; Van de Venter *et al.*, 1991), aumento de absorción de agua, respiración (Noble *et al.*, 1995; Rauthan *et al.*, 1981), longitud y biomasa de los brotes y las raíces. Se atribuye una mayor eficiencia estimulante a los humatos en el crecimiento de la planta en comparación a las SH en el suelo *in vivo*, más a menudo se atribuye tanto a su estructura química en particular o de la influencia fisiológica (Lobartini *et al.*, 1992; Lozanovskaya *et al.*, 1991).

La ciencia del suelo moderna ha acumulado una vasta cantidad de datos concretos sobre las propiedades de los suelos en los diferentes espacios naturales sometidos a diversos impactos antropogénicos. Estos materiales forman una base sólida para la generalización teórica de los conocimientos disponibles. Al mismo tiempo, la adquisición de nuevos datos sobre las propiedades del suelo con el uso de técnicas modernas es necesario resolver muchos problemas teóricos y aplicados. En particular, la nueva información es necesaria para una evaluación integral de las características estructurales y funcionales de suelos (Shishov *et al.*, 1999).

En la actualidad, la morfometría del suelo se basa en un análisis digital de imágenes 2D y 3D de muestras de suelo con una estructura sin perturbaciones. Un análisis automatizado tiene todas las ventajas de la morfología de suelos tradicionales; al mismo tiempo, se excluye el principal inconveniente de este método, es decir, el carácter subjetivo de los datos obtenidos durante el estudio de secciones delgadas.

Las investigaciones morfométricas en la ciencia del suelo, los parámetros cuantitativos de los cambios radicales en la morfología de los distintos tipos de suelo bajo el impacto de su uso agrícola se han obtenido en los últimos 50 años. Por lo tanto, se ha establecido que la labranza del suelo aumenta el número y el volumen total de los macroporos en el horizonte de arado; el perímetro total de macroporos también aumenta, y su forma se vuelve más complicada (Sanzharova, 1988).

Sin embargo, los datos disponibles morfométricos en suelos arados son, por regla general, estrictamente y necesaria su caracterización en los cambios de la estructura y porosidad bajo un impacto particular de labranza; como señaló Dobrovolskii (1988), con el fin de comprender la esencia genética de estos cambios, es necesario comparar los datos morfológicos y morfométricos sobre los horizontes de arado de los suelos en diferentes zonas naturales. Se sabe que los objetivos y métodos de tratamientos en suelos

agrícolas favorecen al desarrollo de algunas características comunes o cierre en los suelos de génesis diferentes, ya en la década de 1950, Blagovidov (1954) señaló que los objetivos y resultados de la explotación agrícola de los suelos tienen un carácter interzonal, que se manifiesta por la convergencia de parámetros agronómicos importantes (estructura, porosidad, contenido de humus, el grado de elaboración zoogénico de la masa de suelo, etc).

Los suelos difieren en sus materiales matriciales y en el carácter de la distribución pedogenética en los perfiles del suelo, patrones de distribución del contenido de materia orgánica, diversos edaforrasgos, estructura del suelo y otras características; también difieren en la organización de su espacio poroso, perfiles estructurales que es posible distinguir por el diagnóstico de perfiles que representan el sistema de poros del suelo en la secuencia vertical de horizontes.

La presencia de poros que no están relacionados con las unidades estructurales amplía nuestros puntos de vista sobre el papel de espacio de los poros en la organización estructural de los organismos del suelo. Huecos de embalaje, puede ser considerada como una función de la estructura del suelo (estado de agregación) (Blagovidov, 1954), mientras que los poros de génesis biológica, física y química juegan su propio papel los que afectan directamente a las propiedades del suelo morfológicas y estructurales-funcionales.

Para caracterizar el espacio de los poros del suelo, los valores de la porosidad total y diferencial se utilizan, sin embargo, incluso la diferenciación más detallada de los poros del suelo con respecto a sus volúmenes no proporciona información adecuada en el carácter de la porosidad del suelo, debido a que las relaciones entre los volúmenes de los poros del suelo de diferentes tamaños, no reflejan la estructura del espacio poroso en toda su extensión. El espacio de poros del suelo se caracteriza no sólo por el tamaño de distribución, también por la forma, orientación y disposición mutua de diferentes poros en la masa del suelo. Un conjunto de estos índices tiene la máxima cantidad de información de la génesis y las funciones del espacio de poros del suelo. A menudo, la génesis de los poros del suelo se refleja directamente en sus nombres: cámaras biogénicas, embalaje vacíos entre los granos del esqueleto, etc. (Tortik, 1992). Por lo tanto, una caracterización completa del espacio poroso del suelo debe incluir sus características morfológicas y morfométricas.

Datos cuantitativos morfométricos forman la base de un nuevo enfoque hacia la caracterización de la porosidad del suelo. Generalizados índices

morfométricos de espacio de los poros del suelo pueden ser considerados como ciertas aproximaciones a los arquetipos del estado total de poro en los suelos (perfiles de espacio).

La noción de arquetipo es tomado de mereología, una ciencia que estudia la estructura (relaciones parte-todo) de los objetos clasificados (Meien, 1976). La noción de merónimo se puede definir como una parte de la totalidad, o un componente separado del conjunto con sus propias características de diagnóstico. En términos de mereología, las diferentes variantes de la morfología del espacio-poro específico de estructuras particulares del suelo u horizontes genéticos y carácter dado por grupos definidos de los índices morfométricos, que se analizan en conjunto, nos dan una imagen integral de los poros del espacio del suelo.

El uso del concepto de arquetipos a la descripción del espacio de los poros del suelo se justifica por la disposición espacial compleja (arquitectura) de los poros. Independientemente de la calidad de los objetos analizados (imágenes 2D o 3D), el análisis de los poros del suelo es complicado por la gran variabilidad espacial de sus características principales. De manera generalizada el diagnóstico de espacio de los suelos puede ser interpretado de diferentes maneras. En cuanto a la taxonomía, la podemos considerar un promedio o modal, o un poro mediano del espacio del grupo descrito en los suelos. En términos de meronomía, puede ser presentada como una imagen idealizada sobre la base de la experiencia personal de un investigador o de sus consideraciones generales.

Información de la imagería del suelo en suelos incluye diversas características de los poros, por ejemplo, distribuciones de tamaño de poro, conectividades de poro y tortuosidades. Cuando se trabaja con sistemas artificiales, por ejemplo, perlas de vidrio o colecciones de tubos capilares, algunas de estas características (porosidades, superficies sólidas, y las distribuciones de tamaño de poro) se puede calcular sobre la base de las propiedades del sistema. Así, el funcionamiento de los métodos de segmentación se puede evaluar sobre la base de lo cerca que coinciden con los valores calculados teóricamente, por lo que la porosidad total de la muestra se puede medir de manera exacta (Iassonov et al., 2009).

OBJETIVO

Implementar de una técnica de impregnación, que permita la cuantificación de la porosidad del suelo en muestras sin disturbar.

HIPOTESIS

El impacto del manejo del suelo se puede describir, mediante la evolución de los espacios vacíos existentes en el mismo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación del Área Experimental

El estudio se llevó a cabo en el vivero de planta nativa de las instalaciones de la Facultad de Agronomía de la Universidad Autónoma de Nuevo León. El clima predominante en el área es semiseco muy cálido con lluvia en verano. Las temperaturas medias oscilan entre 14.7 °C en el mes de enero y 22.3 °C en el mes de agosto. Los meses más cálidos son junio, julio y agosto, con una temperatura media mensual que oscila entre 27 y 28 °C y el mes más frío es enero, con una temperatura media menor de 15 °C, sin embargo, es común observar en el verano (junio-agosto) temperaturas máximas extremas de 44 °C y en el invierno (enero-marzo) las heladas llegan a los -3 °C. La precipitación anual de ésta región fluctúa de 700 a 1200 mm. El máximo régimen pluvial mensual se registra en septiembre con promedio de 160 a 170 mm y el mínimo de 10 a 15 mm se presenta en marzo (SNM, 2010).

Manejo del cultivo

Se trasplantaron el mes de mayo plántulas de chile jalapeño (*Capsicum annuum L.* var. M) en macetas que contenían 10 kg⁻¹ de suelo de un horizonte Ap 0-30 cm, la fertilización química se realizó de acuerdo a los lineamientos de la solución nutritiva balanceada, procedimiento Steiner. La fórmula para el fertirriego de este cultivar está tomada en base a un cultivo de chile jalapeño, adaptado a climas cálidos y con resistencia a la sequía.

Se manejó un diseño experimental completamente al azar, dos diferentes niveles de aplicación de AH y AF (2 y 6 mL l⁻¹), una fertilización química sin hierro y calcio, (SNC, SNs/Fe y SNs/Ca) y fertilización química completa (Testigo), los tratamientos fueron ajustados a pH (6 y 7) (Cuadro 1).

Cuadro 1. Distribución de tratamientos para chile jalapeño.

| |
|----------------|
| Chile Jalapeño |
|----------------|

| pH 6 | pH 7 |
|------------------------------|------------------------------|
| AF + Ca 2 mL L ⁻¹ | AF + Ca 2 mL L ⁻¹ |
| AF + Ca 6 mL L ⁻¹ | AF + Ca 6 mL L ⁻¹ |
| AH + Fe 2 mL L ⁻¹ | AH + Fe 2 mL L ⁻¹ |
| AH + Fe 6 mL L ⁻¹ | AH + Fe 6 mL L ⁻¹ |
| SNs/Fe | SNs/Fe |
| SNs/Ca | SNs/Ca |
| SNC | SNC |

AF. Ácidos Fúlvicos; AH. Ácidos Húmicos; SNs/Ca. Solución Nutritiva sin Calcio; SNs/Fe. Solución Nutritiva sin Hierro; SNC. Solución Nutritiva Completa.

Obtención de muestra

Terminado el ciclo productivo del cultivar, la obtención de la muestra de suelo no alterado, se utilizó la siguiente metodología:

Se eliminó el vástago de la planta y se dejó secar el suelo dentro de la maceta por 72 h a cielo abierto.

Concluida la etapa anterior, se procedió a eliminar la maceta con una esmeriladora angular (disco de 1/2", 2000 watts 18amps. Makita mga700); con el uso del mismo esmeril se eliminó el suelo contenido en el recipiente plástico, haciendo el corte lo más fino y rápido posible para obtener un cubo de 10 x 10 x 25 cm, se cubrió con papel aluminio y cartón para evitar la alteración de la muestra, se cortó la muestra por la base y se transportó el prisma obtenido al laboratorio para la obtención de monolitos mediante la impregnación de las muestras.

Impregnación y solidificación de la muestra

Se preparó una resina líquida (cristal 00-10-14, Plastiformas de México SA de CV.) de poliestireno insaturado 80 % (2400 mL), se utilizó acetona (CH₃COCH₃) como solvente para la mezcla 20 % (600 mL) y un catalizador (Etil-metil-cetona, 4 gotas por L) es un peróxido orgánico, esta mezcla fue aplicada a las muestras en cinco ocasiones con una diferencia de tiempo de aplicación de 48 h. La resina se aplicó de manera lenta, esto con el fin que la resina no se derramara por los lados, ello permitió la solidificación de la muestra para su posterior análisis de la porosidad.

Cuantificación de la porosidad por análisis de imagen

Una vez solidificada la muestra, se realizó un corte vertical por el centro y dos más a 3cm del primer corte a cada ejemplar de suelo, se tomó una muestra de dimensiones de 2.5 x 2.5 cm en el rango 0-5 cm, enseguida se pulió la superficie de cada sección, hasta obtener la homogeneidad perfecta de la superficie del bloque para su análisis.

Análisis de Imagen

Para poder determinar macroporos el corte es puesto sobre la escala, a esta se le coloca una cámara digital la cual sirve para digitalizar los cortes que se realizaron a cada uno de los cubos de suelo. Posterior a la preparación y digitalización de las muestras las imágenes son procesadas en la computadora para poder cuantificar el tamaño y forma de los espacios vacíos existentes sobre la superficie de los cortes seleccionados bajo un programa computacional Image Pro-Plus® V6.0 (Media Cibernética Maryland, USA).

Dicho programa, se fundamenta en la identificación y determinación automática del número total de objetos que configuran una imagen, Para conseguir la información de las diversas medidas que tienen los cortes de suelo, el sistema debe ser calibrado, ya que es un componente primordial en el proceso de análisis de imagen y la precisión de la información obtenida. Para calibrar el programa, se requiere de una cuadrícula milimétrica de tamaño conocido. Tras la adquisición y proceso de la imagen de calibración, el sistema transforma las medidas reales de las coordenadas «X» e «Y» de la cuadrícula introducidas por el operario, en unidades de píxeles. En el se digitalizan las imágenes iluminadas para convertirlas en imágenes binarias para esto se tienen que anexar al programa los datos correctos de las escalas obtenidas de cada imagen si los datos son incorrectos entonces el programa no cuantifica la porosidad existente en las muestras de suelo hasta que sean corregidos.

Resultados y Discusión

Los resultados obtenidos en los tratamientos con pH 6 en la porosidad total de la muestra (Cuadro 2), podemos observar que la SNC (Testigo) fue superada por el resto de los tratamientos, iniciando con un 591% correspondiente al AF + Ca 2 mL L⁻¹, seguido del AF + Ca 6 mL L⁻¹ en un 327 %, 287 % con AH + Fe 2 mL L⁻¹ y 157 % el AH + Fe 6 mL L⁻¹ y los tratamientos SNs/Fe y SNs/Ca con un 89 y 84 % respectivamente.

Mediante el proceso de binarización de imagen (Figura 1), mostrando los poros en color negro y el material mineral en color blanco, en el área total se cuantificaron los macro poros, por lo que a simple vista se aprecia una estructura de agregación que se genero con el uso de los diferentes tratamientos con pH 6, el tratamiento AF + Ca 2 mL L⁻¹ se cuantifico con la mayor agregación de poros correspondientes a poros mayores y menores a 1 mm²; los materiales orgánicos mezclados con el compuesto inorgánico mostraron la mayor cantidad de agregados que aquellos tratamientos que solo se les incorporo la fertilización química.

Cuadro 2. Porosidad total de la muestras pH 6 en mm².

| Tratamientos pH 6 | Área total mm ² |
|------------------------------|----------------------------|
| AF + Ca 2 mL L ⁻¹ | 20.1610 |
| AF + Ca 6 mL L ⁻¹ | 12.7175 |
| AH + Fe 2 mL L ⁻¹ | 11.1583 |
| AH + Fe 6 mL L ⁻¹ | 6.1077 |
| SNs/Fe | 3.4875 |
| SNs/Ca | 3.2626 |
| SNC | 3.8791 |

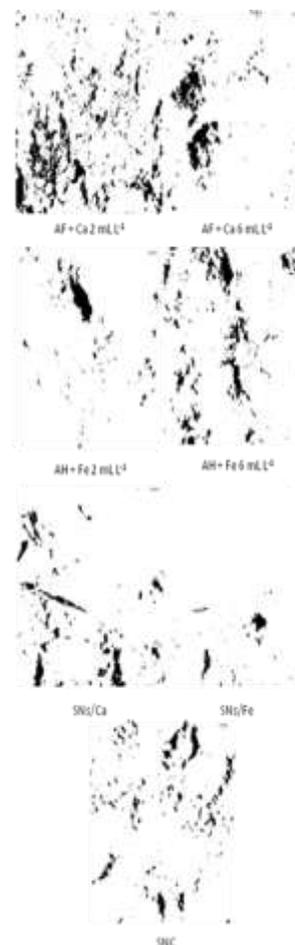


Figura 1. Imagen binaria de porosidad total de la muestras pH 6

Con respecto a los tratamientos a pH 7 aplicados, la SNC y AF + Ca 6 mL L⁻¹ resultaron con la misma área, de igual manera el área total al aplicar el AF + Ca 2 mL L⁻¹ y AH + Fe 2 mL L⁻¹ resulto similar y superaron a la SNC en un 391 %, seguido del AH + Fe 6 mL L⁻¹ con un 127 %, el tratamiento SNs/Fe obtuvo un 51 % y la SNs/Ca no supero al testigo.

Generadas las imágenes binarias (Figura 2), podemos observar que los poros en estos tratamientos se encuentran dispersos en las muestras analizadas, esto genera una menor estabilidad en la agregación del suelo.

Cuadro 3. Porosidad total de la muestras pH 7 en mm².

| Tratamientos pH 7 | Área total mm ² |
|------------------------------|----------------------------|
| AF + Ca 2 mL L ⁻¹ | 2.41824445 |
| AF + Ca 6 mL L ⁻¹ | 0.61702881 |
| AH + Fe 2 mL L ⁻¹ | 2.41824445 |
| AH + Fe 6 mL L ⁻¹ | 0.78570941 |
| SNs/Fe | 0.31780404 |
| SNs/Ca | 0.00097785 |
| SNC | 0.61702881 |

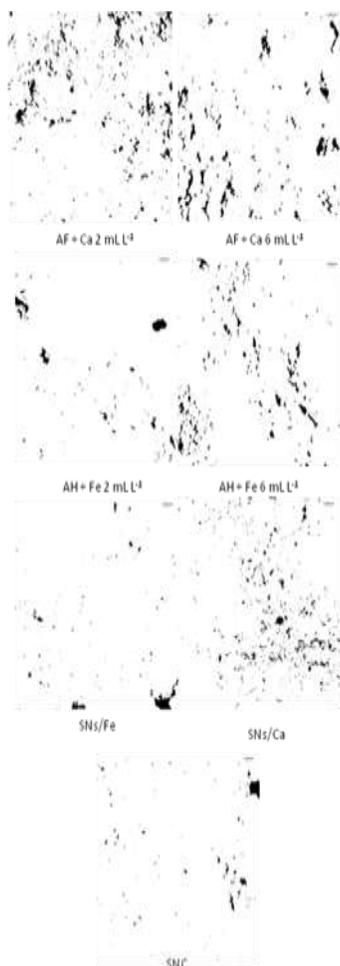


Figura 2. Imagen binaria de porosidad total de la muestras pH 7.

El análisis de imagen se basa principalmente en la obtención y fabricación de monolitos (Bourrier, 1965) de suelo no alterado, para lo cual considera tres criterios esenciales antes del tratamiento de la imagen:

4. La conservación de la estructura original del suelo, cualquiera que sea la naturaleza del material y su humedad.
5. La posibilidad de realizar cortes verticales u horizontales de gran tamaño, con la finalidad de acrecentar al máximo el campo de observación.
6. La homogeneidad perfecta de la superficie del bloque para su análisis.

La estructura del suelo, composición, propiedades de agregación, contenido de materia orgánica, tamaño de partícula, distribución de poros y propiedades químicas, se ven afectadas por el manejo agronómico que se le dé (Chuen *et al.* 2009).

Los resultados obtenidos concuerdan con Skvortsova y Rozhkov (2010), indican que en suelos calcáreos las diferencias morfológicas y arreglo geométrico entre poros son relativamente pequeñas, sin embargo cuando se encuentra en el suelo una fracción húmica en la orientación vertical del horizonte, se denota una tendencia de arreglo hacia la agregación o generación de macro poros.

La digitalización de las muestras de suelo tiene ventajas generales que la hacen necesaria en muchos campos de estudio, ello facilita el cálculo numérico y simplifica el almacenamiento de la información; la interpretación de imágenes monocromáticas permite diferenciar el material sólido del vacío existente en el suelo, ello facilita la descripción de la porosidad y su organización espacial (González y Sánchez, 2004).

La segmentación de un área específica en una imagen digitalizada, genera valores de porosidad cercanos a la imagen real del perfil del suelo, los errores al momento de calcular el total de poros en el área no debe de ser mayor del 4 % (Wang *et al.* 2011).

Conclusiones

Un método no destructivo es el implementar la impregnación de la muestra, el cual genera una imagen que por medio del análisis digital da como

resultado una imagen en escala de grises, que se puede binarizar con la ayuda de un software especializado; con esta imagen es posible identificar estructuras específicas de agregados en el suelo, generando un criterio de resultados aceptables con un mínimo de error.

Los macro poros cuantificados, representan una inter agregación generada por el impacto antropogénicos de los tratamientos adicionales.

Por lo tanto, el impacto y manejo agrícola induce la convergencia de la forma y orientación de macro poros en los horizontes de los suelos, la convergencia ocurre bajo la gestión adecuada o manejo de los suelos. El grado máximo de generación de macro poros o agregados en el suelo se puede observar en la parte superior del horizonte, donde el impacto de los tratamientos es más pronunciado.

LITERATURA CITADA

1. Blagovidov. N, L. (1954) "Development of Podzolic Soils," *Pochvovedenie*, No. 2, 46–60.
2. Bourrier J (1965) La mesure des caractéristiques hydrodynamiques des sols par la méthode Vergière. *Bulletin technique du génie rural*. No.73.
3. Chen H, R Berndtsson, M Ma and K Zhu (2009). Characterization of insolubilized humic acid and its sorption behaviors. *Environ Geol* 57:1847–1853.
4. Chen, C., Lau, B. L. T., Gaillard, J.-F., and Packman, A.I., 2009a: Temporal evolution of pore geometry, fluid flow, and solute transport resulting from colloid deposition, *Water Resources Research*, 45, W06416, doi:10.1029/2008WR007252.
5. Dobrovolskii, "Micromorphological Control of the Development and Cultivation of Soddy-Podzolic Soils," in *Micromorphology of Anthropogenically Modified Soils* (Nauka, Moscow, 1988), pp. 31–36
6. Fründ R, K K Guggenberger, H Haider, I Knicker, H D Kögel-Knaber, J Lüdeman, W Luster And M P Spiteller (1994) Recent advances in the spectroscopic characterization of soil humic substances and their ecological relevance. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk*, 157: 175-186.
7. González-Cervantes G, Sánchez-Cohen I y Rossignol JP (2004) Morfología de los poros de circulación preferencial del agua en el suelo mediante técnicas de análisis de imagen. Caso de una cuenca del norte de México. *Ingeniería Hidráulica de México*. 19, 15-23.
8. Hayes M H B, P MacCarthy, R L Malcolm, and R S Swift (1989) The search for structure: setting the scene. In *Humic Substances II: In Search of Structure*; Eds Wiley New York, pp 3–31.
9. IASSONOV, P., GEBRENEGUS, T. & TULLER, M. 2009. Segmentation of X-ray computed tomography images of porous materials: A crucial step for characterization and quantitative analysis of pore structures. *Water Resources Research*, 45.
10. Lobartini J C and K H Tan (1992) The geochemical nature and agricultural importance of commercial humic matter, *Sci. Total Environ*. 1/3, 1-5.
11. Lozanovskaya I N, I A Luganskaya, G A Senchukov and S and V Gninenko (1991) Effectiveness of coal-humate fertilizers on irrigated chernozems of Rostov area, in E.V. Poluektov (eds.), *Remediation and Utilization of Low-Fertile Soils*, pp. 58-64.
12. MacCarthy P, C E Clapp, R L Malcolm and P R Bloom (eds) (1990) *Humic Substances in Soil and Crop Sciences: Selected Readings*, Soil Sci. Soc. Am., Madison, WI.
13. Mbagwu J S C. and A Piccolo (1997) Effect of humic substances from oxidized coal on soil chemical properties and maize yield, in J. Drozd, S.S. Gonet, N. Senesi, and J. Weber (eds), *The Role of Humic Substances in Ecosystems and in Environmental Protection*, PTSH, Wroclaw, Poland, pp. 921-925.
14. Meien S. V. and Yu. A. Shreider, "Methodological Aspects of the Theory of Classification," *Vopr. Filos.*, No. 12, 67–79 (1976).

15. Nardi S, A. Muscolo, S Vaccaro, S Baiano, R Spaccini and A Piccolo (2007) Relationship between molecular characteristics of soil humic fractions and glycolytic pathway and Krebs cycle in maize seedlings. *Soil Biol Biochem* 39:3138–3146.
16. Noble A D, P J Randall and T R James (1995) Evaluation of two coal-derived organic products in ameliorating surface and subsurface soil acidity, *Europ. J. Soil Sci.* 46, 65-75.
17. 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* 63:1801–1810.
18. Piccolo A, G Pietramellara and J S C Mbagwu (1997) Use of humic acids substances as soil conditioners to increase aggregate stability, *Geoderma* 75, 267-277.
19. Pinton R, S Cesco, G Iacoletti, W S Astol and Z Varanini (1999) Modulation of NO₃- uptake by water-extractable humic substances: involvement of root plasma membrane H⁺-ATPase. *Plant Soil* 215:155–161.
20. Quaggiotti S, B Rupert, D Pizzeghello, O Francioso, V Tugnoli and S Nardi (2004) Effect of low molecular size humic substances on nitrate uptake and expression of genes involved in nitrate transport in maize (*Zea mays* L.). *J Exp Bot* 55:803–813.
21. Rauthan B S and M Schnitzer (1981) Effects of soil fulvic acid on the growth and nutrient content of cucumber (*Cucumis sativus*) plants, *Plant and Soil* 63, 491-495.
22. Ryabova, I. N. 2010. Organomineral Sorbent from Shubarkol Coal. ISSN 0361-5219, *Solid Fuel Chemistry*, Vol. 44, No. 5, pp. 335–338.
23. S. I. Sanzharova, Extended Abstract of Candidate's Dissertation in Biology (Moscow, 1988)
24. Schnitzer M (2000) Life Time Perspective on the Chemistry of Soil Organic Matter. D. L. Sparks (Ed.). *Advances in Agronomy*, Academic Press. 98: 3-58.
25. Shishov L. L., D. N. Durmanov, I. I. Karmanov, and V. V. Efremov. 1991. *Theoretical Principles and Methods of Regulating the Fertility of Soils* (Agropromizdat, Moscow, 1991)
26. Sutton R and G Sposito (2005) Molecular structure in soil humic substance: new view. *Environ Sci Technol* 39(23):9009–9016.
27. E. B. Skvortsova, V. A. Rozhkov. 2011. Morphometric profiles of pore space in loamy soils of the forest and steppe zones of European Russia. *Eurasian Soil Science - EURASIAN SOIL SCI* , vol. 44, pp. 1104-1116.
28. N. I. Tortik, Extended Abstract of Candidate's Dissertation in Biology (Moscow, 1992)
29. Ulanov N N (1993) Possibilities of use of oxidized coal and humic substances in agriculture, in D.S. Orlov (eds.), *Humic Substances in Biosphere*, Nauka, Moscow, pp. 157-162.
30. Van de Venter H A, M Furter, J Dekker And I J Cronje (1991) Stimulation of seedling root growth by coal-derived sodium humate, *Plant and Soil* 138, 17-21.
31. Wang, Q., Luo, J., Zhong, Z., Borgna, A., 2011a. CO₂ capture by solid adsorbents and their applications: current status and new trends. *Energy Environ. Sci.* 4, 42–55.

