CAMBIOS EN LA ESTABILIDAD ESTRUCTURAL DE UN *MOLLISOL* TRATADO CON VINAZA

TATIANA QUIROZ MARIN

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS
COORDINACION GENERAL DE POSTGRADOS
PALMIRA
2009

CAMBIOS EN LA ESTABILIDAD ESTRUCTURAL DE UN *MOLLISOL* TRATADO CON VINAZA

TATIANA QUIROZ MARIN

Trabajo de grado para optar al título de Magíster en Ciencias Agrarias
Línea de Investigación Suelos

DIRIGIDO POR:

HERNAN ROJAS PALACIOS
Profesor Asociado D.E Departamento de Ingeniería

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS
COORDINACION GENERAL DE POSTGRADOS
PALMIRA
2009

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

SEDE PALMIRA

FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

ACTA DE JURADO DE TESIS

MAESTRÍA EN CIENCIAS AGRARIAS
LINEA DE INVESTIGACIÓN SUELOS

En Palmira a los 19 días del mes de Noviembre de 2009, se reunió en esta Sede el Jurado Calificador de Tesis, integrado por los doctores JUAN CARLOS MENJIVAR FLORES y HAROLD TAFUR HERMANN

Para calificar la Tesis de Grado de:

TATIANA QUIROZ MARIN

Titulada:

"CAMBIOS EN LA ESTABILIDAD ESTRUCTURAL DE UN MOLLISOL TRATADO CON VINAZA" bajo la dirección del M.Sc. Hernán Rojas Palacios.

Después de oír el informe del jurado evaluador compuesto por los Doctores JUAN CARLOS MENJIVAR FLORES y HAROLD TAFUR HERMANN, y de haber cumplido con el proceso de evaluación, la tesis fue calificada como:

APROBADA X

REPROBADA ____

JUAN CARLOS MENJIVAR FLORES

HAROLD TAFUR H.

“La facultad y los jurados de la tesis
no se harán responsables de las
Ideas emitidas por el autor”
Articulo 24, resolución 04 de 1974

DEDICATORIA

A mis Padres por creer en mí y darme su apoyo incondicional.

A mí adorada hija Isabella que nació durante el proceso de realización de este trabajo y se convirtió en el mejor aliciente para culminarlo con éxito.

A Fernando por su apoyo permanente e infinita paciencia**.**

AGRADECIMIENTOS

Mis más sentidos agradecimientos:

Al profesor Hernán Rojas Palacio por su valiosa orientación e infinita paciencia.

Al Dr. Juan Carlos Menjivar Flores por su brindarme su confianza y apoyo, sin el cual no hubiese sido posible la realización de este trabajo.

Al Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé por el préstamo de un equipo empleado en las determinaciones.

Al señor Yury Peralta por su colaboración en la consecución del suelo estudiado.

Al grupo de investigación en suelos y aguas con énfasis en degradación de suelos, por su colaboración.

A mis amigos: Edgar Hincapié, Sandra Pulido, Ana Tereza Mosquera, Diana Velásquez, Oswaldo Puerto, Giovanny Lugo, Claudia Ipaz y demás compañeros que formaron parte de este posgrado, por hacer de el una experiencia de vida inolvidable y Maravillosa.

A todos y cada uno Gracias.

CONTENIDO

pág.

INTRODUCCION 17

1. OBJETIVOS 19

1.1 OBJETIVO GENERAL 19
1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS 19
2. HIPÓTESIS 20

3. MARCO TEORICO 21

3.1 Estructura del suelo 21
3.2 Fuerzas de floculación 21
3.3 Mecanismos de agregación 22
3.3.1 Teorías acerca de la formación de agregados 23
3.4 Agregación y formación estructural 25
3.5 Propiedades de los agregados 26
3.5.1 Resistencia de los agregados del suelo 26
3.5.2 Hidrofobicidad de los agregados 26
3.6 Factores que afectan la agregación 27
3.6.1 Alteración del humedecimiento y secamiento 27
3.6.2 Coloides de hierro y Aluminio 28
3.6.3 Enmiendas 29
3.6.4 Efectos de la materia orgánica 29
3.7 Estabilidad estructural 32
3.8 Microscopia de suelos: micromorfografía y micromorfología 33
3.8.1 Agregación 34
3.8.2 Edaforrasgos 36
3.9 Composición de la vinaza 38
3.8.1 Estudios sobre aplicación de vinazas a los suelos 41
3.8.2 Estudios sobre aplicación de vinazas a los suelos del Valle del Cauca 43
4. MATERIALES Y METODOS 46

4.1 Localización 46
4.2 Diseño experimental 46
4.3 Conducción del experimento 46
4.4 Descripción de las Unidades experimentales 47
4.5 Variables respuesta y metodología empleada para su determinación. 48
4.6 Análisis de resultados 50
5. RESULTADOS Y DISCUSION 51

5.1 Caracterización del suelo 51
5.1.1 Propiedades químicas 51

5.2 Propiedades físicas 56
5.1.3 Análisis mineralógico 57
5.2 Caracterización química de la vinaza 58
5.3 Laminas delgadas de suelo 59
5.4 Estabilidad estructural determinada en húmedo 59
5.5 Estabilidad estructural determinada en seco 62
5.6 Resistencia de los agregados a una fuerza de impacto 64
5.7 Resistencia de los agregados a la compresión 67
6. CONCLUSIONES 69

BIBLIOGRAFIA
ANEXOS 78

LISTA DE TABLAS

pág.

Tabla 1. Características diferenciales de los edaforrasgos (Dorronsoro, 2002) 36
Tabla 2 Composición elemental de las vinazas de 55% y de 10% de sólidos totales 39
Tabla 3 Resumen de usos de la vinaza 40
Tabla 4 Tratamientos planteados en el experimento 47
Tabla 5 Descripción de las variables evaluadas en los suelos de estudio y metodología empleada para su determinación 49
Tabla 6. Propiedades físicas del suelo estudiado 56
Tabla 7. Resultados análisis mineralógicos por difracción de rayos X.....58
Tabla 8. Caracterización química de la vinaza empleada 59
Tabla 9. Cambios en la distribución de agregados (%) secos al aire por efecto del paso del tiempo.....63

LISTA DE FIGURAS

pág.

Figura 1. Diferentes tipos de agentes cementantes.....25
Figura 3. Tipos de agregados en función de su grado de desarrollo y acomodación (Tomado de Dorronsoro, 2002).....35
Figura 4 Recolección y empaque de las muestras de suelo.....48
Figura 5 Promedios encontrados de los contenidos de elementos con cada tratamiento. Valores con la misma letra no difieren significativamente (Prueba de Duncan <0,05) 55
Figura 6. Curva de retención de humedad determinada en el suelo estudiado. 57
Figura 7. Determinación de la estabilidad estructural en húmedo. DPM en función del tiempo y las dosis de vinaza 61
Figura 8. Determinación de estabilidad estructural en seco. DPM en función del tiempo y las dosis de vinaza 64
Figura 9. DPM promedio por cada nivel de energía aplicado. 65
Figura 10. Determinación de estabilidad estructural sometiendo los agregados a una fuerza de impacto. DPM en función del tiempo y las dosis de vinaza.....66
Figura 11. Determinación de la estabilidad estructural por el método de resistencia a la compresión. DPM en función del tiempo y las dosis de vinaza.....68

LISTA DE ANEXOS

pág.

Anexo 1 Metodologías de laboratorio que empleadas en la determinación de las Variables respuesta. 79
Anexo 2. Análisis de varianza para contenido de M.O entre tratamientos 85
Anexo 3. Prueba de promedios para el contenido de M.O 85
Anexo 4 Análisis de varianza para contenido de Ca entre tratamientos 85
Anexo 5. Prueba de promedios para el contenido de Ca.....86
Anexo 6. Análisis de varianza para contenido de Mg entre tratamientos.....86
Anexo 7. Prueba de promedios para el contenido de Mg 86
Anexo 8. Análisis de varianza para contenido de K entre tratamientos 86
Anexo 9. Prueba de promedios para el contenido de K.....87
Anexo 10. Análisis de varianza para contenido de Fe entre tratamientos 87
Anexo 11 Prueba de promedios para el contenido de Hierro 87
Anexo 12. Análisis de varianza para contenido de Cu entre tratamientos 87
Anexo 13. Prueba de promedios para el contenido de Cu.....88
Anexo 14. Análisis de varianza para contenido de B entre tratamientos 88
Anexo 15. Prueba de promedios para el contenido de B.....88
Anexo 16. Análisis de varianza para contenido de Zn entre tratamientos 88
Anexo 17. . Prueba de promedios para el contenido de Zn 89
Anexo 18. Microfotográfias de láminas delgadas de suelo. 90
Anexo 19 Resultados análisis micromorfológicos de lámina delgada de suelo 91
Anexo 20 Análisis de varianza realizado en la prueba estabilidad de agregados en húmedo. 92
Anexo 21. Pruebas de promedios por muestreos en la prueba de estabilidad de agregados en húmedo. 92

Anexo 22. Análisis de varianza de los diferentes tamices, para la distribución de agregados en seco 93
Anexo 23 Clasificación de la estabilidad estructural según la cantidad de agregados con diámetro menor de 0,5mm. (Montenegro y Malagon, 1990) 95
Anexo 24 Análisis de varianza para la variable DPM, en los tratamientos aplicados en la prueba de estabilidad de agregados en seco.....95
Anexo 25 Prueba de promedios por muestreos para la variable DPM en los tratamientos aplicados para la prueba de estabilidad de agregados en seco.....95
Anexo 26 Análisis de varianza para la variable DPM, en la prueba resistencia de los agregados a una fuerza de impacto. 96
Anexo 27 Prueba de promedios para niveles de energía en la prueba de estabilidad determinada por resistencia a una fuerza de impacto 96
Anexo 28 Prueba de promedios por muestreos para la variable DPM en la estabilidad determinada por resistencia a una fuerza de impacto 97
Anexo 29 Análisis de varianza para la variable energía (J/m²), en la prueba resistencia de los agregados a la compresión 97
Anexo 30 Prueba de promedios para la energía en la prueba de estabilidad determinada por resistencia a la compresión 97

.

RESUMEN

La vinaza, subproducto de la destilación de alcohol carburante, posee una elevada concentración de electrolitos y es empleada en agricultura como fertilizante. Algunos autores afirman que independientemente de este uso, se puede emplear para promover una mejor agregación en los suelos (Camargo, 1983; García, *et al*. 2006). Teniendo en cuenta esas afirmaciones, se planteó esta investigación, que evaluó el efecto de la aplicación de cuatro diferentes dosis de vinaza (0, 5.000, 10.000 y 15.000 Kg*ha-1) a través del tiempo (dos, cuatro y seis meses después de la aplicación de la vinaza mdda), sobre la estabilidad estructural de un *Mollisol*. Se encontró que este es un suelo con un pH medianamente alcalino, con altos contenidos iniciales de Ca^{++}, Mg^{++} y Fe^{++} y contenido medio de M.O; seis mdda se incrementaron sustancialmente los contenidos de Ca^{++}; Mg^{++}, K^{+}, y M.O. El suelo mostró una textura Franco arcillosa, con densidad aparente de 1,22g.cm^3, alta conductividad hidráulica y buena porosidad total con un 55%; en cuanto a composición mineralógica se encontró que el suelo esta compuesto en su mayoría por caolinita y gibsita, ambos minerales de tipo 1:1. La vinaza del 23 ºBrix presento una fuerte acidez y altos contenidos de potasio y elementos menores. Según el criterio de clasificación para la estabilidad estructural determinada en húmedo este suelo es inestable, mientras que para la determinación en seco el resultado fue un nivel medio de estabilidad. Los resultados encontrados en la determinación de la estabilidad estructural fueron consistentes en los cuatro métodos empleados; se halló una tendencia lineal decreciente en la estabilidad estructural con el tiempo, mas no con las dosis de vinaza. En la prueba de estabilidad de agregados en seco, el suelo mostró mayor valor de DPM en el muestreo realizado dos mdda. En la prueba de estabilidad en húmedo y resistencia al impacto, los valores mas altos de DPM se presentaron en los muestreos realizados dos y cuatro mdda siendo estos estadísticamente iguales entre si y diferentes al realizado seis mdda. Los resultados obtenidos en la

medición de la resistencia de los agregados a la compresión no presentaron diferencias significativas ni entre tratamientos ni entre muestreos. En general , mostrando que dos meses después de la aplicación de la vinaza hubo un descenso en esta propiedad, variables químicas y biológicas podrían explicar este comportamiento físico. El efecto agregante de la vinaza se podría comprobar mas certeramente aplicándolo en suelos poco estructurados de forma continua.

Palabras clave: vinaza, estabilidad estructural, Diámetro Ponderado Medio.

SUMMARY

Vinasse generated when distilled alcohol is produced to be used as biofuel, contains a high electrolytes concentration being appropriated to be used as fertilizer. Some authors, state that this vinasse can be used to promote a good soil aggregation (Camargo, 1983; García, *et al*. 2006). Based on these observations, in this work, was evaluated the effect of four different vinasse doses (0, 5.000, 10.000 y 15.000 Kg*ha-1) on the structure stability of a *Mollisol,* during two, four and six months after vinasse application (maa). Results obtained indicated that this soil have a medium alkaline pH, contains high amounts of Ca^{++}, Mg^{++} y Fe^{+++}, and a medium amount of O.M; Six maa Ca^{++} Mg^{++}, K^{+}, y M.O. content increased, apparent density was 1,22 g/cm^3, a high hydraulic conductivity was evident (8,5cm^3/h) and a total porosity of 55%. Mineral content was composed by kaolinite and gibbsite in a great part, both minerals 1:1 type. The vinasse containing 23º brix showed a pH 4.5, and a high content of potassium and minor elements. According to criterion for the classification to wet stability, this soil is unstable, while for dry determination the result was a medium level of stability. The findings in structural stability were consistent in all four methods employed; found a decreasing linear trend over time, but not with vinasse doses. In the dry structural stability test, the soil showed higher value of Mean Weight Diameter (MWD) in the sampling conducted two months after application. In the wet structural stability test and the impact resistance the MWD higher value were found in the sampling conducted two and four months after application these being statistically similar to each other. The findings in compression aggregates resistant no showed significant differences either between treatments or between sampling. In general was found that the vinasse application, was a possible short-term effect on soil structural stability, showing that two months after vinasse application there was a decrease in this property, chemical and biological variables could explain the physical behavior. The vinasse good effect could be confirmed applying it in a continuous way in different doses and in soils having poor structure.

Key words: vinasse, structural stability, Mean Weight Diameter

INTRODUCCION

Ante la crisis energética actual, una de las fuentes combustibles sustitutas o complementarias al petróleo, es el alcohol carburante, generado a partir de la fermentación de azúcar o de almidón convertido en azúcar. Como resultante de esta producción se genera un subproducto, la vinaza. Esta posee una elevada concentración de electrolitos, y por ello, es empleada como fuente fertilizante en suelos del Valle del Cauca.

En algunos países de Europa y América latina se ha investigado el efecto de la aplicación de vinazas y dependiendo de las condiciones ambientales, edafológicas y composición de la vinaza empleada, han encontrado efectos tanto benéficos como contraproducentes en la estabilidad estructural de los suelos (Da Silva y Oliveira,. 1987; Tejada, *et al*, 2007).

En Colombia a partir de una tonelada de caña procesada se producen aproximadamente 800 litros de vinaza (Korndörfer et al., 2004). Debido a su elevado contenido en potasio, se han realizado investigaciones en las cuales se establecieron las dosis de vinaza requeridas por el cultivo de la caña de azúcar como sustituto o complemento de la fertilización en este elemento y actualmente se aplica este producto en gran parte de los suelos del Valle Geográfico del Río Cauca que se encuentran en esta explotación (Quintero, 2006).

Según Camargo, 1983; García, *et al*. 2006 “las vinazas poseen una elevada concentración de electrolitos y estos tienen un reconocido efecto floculante, independientemente de su poder fertilizante, se pueden utilizar para promover una mejor agregación de suelos estructuralmente degradados o con problemas de permeabilidad; adicionalmente afirman que la aplicación de vinaza en los suelos

contribuye al incremento de la actividad de los microorganismos, los cuales gracias a las sustancias excretadas y secretadas que descomponen la materia orgánica, unen entre si las partículas del suelo mejorando de esta forma la agregación".

Bajo las condiciones tanto de suelos como ambientales del Valle Geográfico del Río Cauca no se ha estudiado cual es la influencia de la aplicación de vinazas en la estabilidad estructural del suelo. Es por ello que como parte de las investigaciones adelantadas por el grupo de investigación de Uso y Manejo de Suelos y Aguas con énfasis en degradación de suelos de la Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira, se plantea la presente investigación, la cual pretende evaluar el efecto de la aplicación de diferentes dosis de vinaza en la estabilidad estructural de un *Molliisol* del Valle Geográfico del Río Cauca a través del tiempo.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar el efecto de la aplicación de vinaza en la estabilidad estructural de un *Mollisol* del Valle Geográfico del Río Cauca.

1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Estudiar la relación temporal existente entre la aplicación de diferentes dosis de vinaza a un suelo y su estabilidad de agregados.

- Determinar cambios en la distribución de agregados debidos a la aplicación de diferentes dosis de vinaza en un tiempo.

- Evaluar cambios a través del tiempo en la resistencia a la ruptura de los agregados del suelo considerando las diferentes dosis de vinaza aplicada.

2. HIPÓTESIS

La aplicación de diferentes dosis de vinaza en un *Mollisol* del Valle Geográfico del Río Cauca modifica su estabilidad estructural a través del tiempo.

3. MARCO TEORICO

3.1 Estructura del suelo

La estructura del suelo representa una importante propiedad del suelo. Su estabilidad expresada como estabilidad de los agregados del suelo, influencia directa o indirectamente otras propiedades físicas y químicas del suelo y puede ser usado como un indicador de la degradación del suelo (Cerda, 2000).

Existen diferentes conceptos o definiciones de estructura del suelo:

La pedológica afirma que la estructura de un suelo se refiere al tamaño, forma, arreglo y empaquetamiento de las partículas dentro de unidades llamadas agregados o peds; la Edafológica, asevera que es el ensamblaje de agregados y espacios vacíos, inter e intraagregados, o el arreglo de la fase sólida del suelo y el espacio poroso localizado entre las partículas constituyentes; la estructura del suelo es según la Ingeniería: la resistencia y estabilidad de agregados y espacios porosos, en términos de su compresibilidad, capacidad de afectar procesos y permeabilidad; la ecológica quizá sea la mirada mas completa; combina visión pedológica, edafológica, y da una mirada holística. “La estructura se refiere al tamaño, forma y resistencia de poros y agregados, capacidad de los poros de retener y transmitir fluidos, disolver y suspender materiales y la habilidad de soportar el desarrollo de plantas vigorosas (Lal, 2004).

3.2 Fuerzas de floculación

Se entiende por floculación el proceso mediante el cual se unen las partículas sólidas del suelo entre sí, obedeciendo a diferentes mecanismos físico-químicos. Ésta es realizada, generalmente, por fuerzas electrostáticas entre aquellas

partículas y otros elementos del suelo como el agua o los cationes; esta unión no es permanente en el tiempo y puede desaparecer fácilmente, al cambiar las condiciones que la producen. También se puede producir mecánicamente, mediante la acción de raicillas de plantas o de hifas de hongos; este último tipo se ha llamado, algunas veces, **bioestructura**.

En el suelo este fenómeno se presenta muy influenciado por la presencia de cationes polivalentes (Ca^{++}, Al^{+++}, etc.), los cuales actúan como puente entre las partículas sólidas cargadas negativamente o entre moléculas de agua unidas a las partículas. A igual concentración de iones, el de mayor carga domina el proceso y su efecto es más rápido y produce flóculos más grandes, entre mayor sea la carga (Jaramillo 2002).

3.3 Mecanismos de agregación

Los mecanismos de agregación incluyen fuerzas exógenas y fuerzas interactivas o endógenas generadas a partir de la interacción suelo-agua. Consecuentemente se observa un arreglo específico de las partículas que es dictado por la naturaleza de las fuerzas endógenas y exógenas. Avances en la química de los coloides han facilitado y mejorado el entendimiento de los procesos de agregación.

La importancia de la arcilla y el humus en la formación de agregados fue reconocida por primera vez por Scholoesing en (1874) y posteriormente Dumount (1990) (citados por Lal, 2004) quien investigó acerca de la importancia del material coloidal amorfo en la agregación. Existen diferentes teorías acerca de los procesos de agregación.

3.3.1 Teorías acerca de la formación de agregados

Russell (1934) citado por Lal (2004) planteó que las partículas de arcilla se mantienen juntas dentro de agregados a través de enlaces iónicos. En donde las arcillas funcionan como agentes de enlace. El sistema de enlace esta constituido por partícula–agua orientada.

La teoría de los enlaces de Calcio sostiene que estos forman agregados estables al agua, los cuales fueron más efectivos en presencia de poliuronidas, (un componente de la materia orgánica del suelo), que sin ellas, Los materiales orgánicos cargados negativamente tales como polisacáridos son adsorbidos sobre la superficie de la arcilla por el Ca^{++} u otros cationes polivalentes (Fe^{+++}, Al^{+++}).

El concepto de “estructura arcilla-agua”, sugirió que la adhesión entre partículas de arcilla se fundamenta en la diferencia de energía superficial del agua adsorbida y los poros líquidos de agua.

La teoría de proximidad Borde-Cara consiste en las fuerzas de atracción y repulsión interpartículas. La floculación es el resultado de la atracción electrostática entre los bordes positivos y las caras negativas de la arcilla.

La teoría de Emerson propone que los agregados son cementados como unas cartas o por un tipo de roce de las partículas de los flóculos por atracción cara-negativa, borde-positivo. De acuerdo con este modelo el cuarzo y la arcilla forman parte de un agregado. Sin embargo esta estructura desaparece cuando el suelo esta seco y la arcilla tipo 2:1 muestra una orientación paralela de sus lados planos. El agregado es estable cuando el complejo de cambio esta dominado por Ca^{++} y otros cationes polivalentes.

La teoria de Arcilla-dominio afirma que los cristales de arcilla existen formando partículas, compuestas por muchos cristales en alineación paralela y de mutua atracción electrostática con un tamaño aproximado de 5μ de diámetro. Grupos de dominios constituyen un microagregado que pueden tener un tamaño aproximado de 50-250 μm, y los microagregados se encuentran agrupados para formar un agregado que puede ser de 1-5 mm de diámetro.

La teoría del Quasi cristal propone describir regiones de aluminosilicatos alineadas paralelamente en un tipo de arcillas expandibles las cuales exhiben una expansión intracristalina (montmorillonita).

La teoria de los microagregados sostiene que el suelo consiste en microagregados (<250μm) unidos dentro de macroagregados (>250μm) y que los enlaces dentro de los microagregados son más fuertes que los que se presentan entre macroagregados.

La jerarquía de los agregados proponen que los agregados dentro de un rango de 20-250μm estan divididos dentro de agregados 20-90μm y 90-250μm.

En el modelo del núcleo las partículas de materiales orgánicos forman un núcleo alrededor del cual los quasi cristales y pequeños microagregados son unidos para formar un macroagregado. La materia orgánica fresca es colonizada por la población microbial y sus excreciones, poseen propiedades adhesivas las cuales mantienen unidas las partículas (Lal, 2004).

3.4 Agregación y formación estructural

El proceso de formación de agregados o complejos organo-minerales, a partir de partículas primarias y húmicas y otras sustancias cementantes es llamado agregación. Este es el primer paso en el desarrollo de la estructura del suelo. Agregación es floculación mas cementación. En la figura 1 se observan algunos agentes que actúan como cementantes en los suelos, se destacan los orgánicos transitorios y temporales, estos son de especial importancia para este trabajo puesto que dada la composición de la vinaza aplicada, pueden ser los causantes del efecto sobre la agregación del suelo.

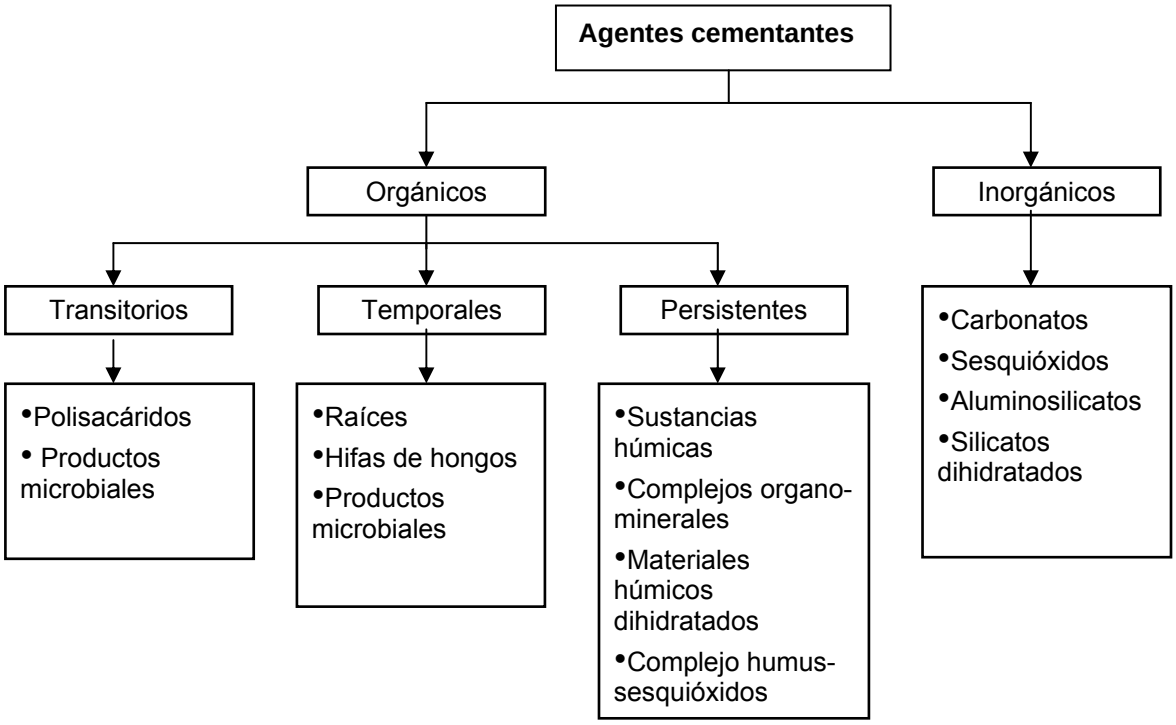


Figura 1. Diferentes tipos de agentes cementantes

Fuente: Harris et al., 1966 citado por Lal 2004

3.5 Propiedades de los agregados

Los agregados poseen características especiales en su interior y exterior. El exterior puede estar recubierto con láminas de arcilla, precipitados inorgánicos, sesquióxidos y materia orgánica. El exterior también puede tener diferente forma (angular, subangular, prismática, laminar), tamaño (grueso, mediano o fino) y grado de resistencia y compactación. Igualmente el interior de un agregado puede ser: compactado o perderse, aeróbico o anaeróbico, giroscópico o hidrofóbico, difícil para secarse cuando esta húmedo o lento para mojarse cuando está seco.

3.5.1 Resistencia de los agregados del suelo

Es la habilidad de los agregados de conservarse cuando son sometidos a fuerzas externas como trafico vehicular, impacto de gotas de lluvia, presión de raíces. El conocimiento de la magnitud, y distribución de la resistencia del agregado es la clave para entender la respuesta del suelo a la labranza o el tráfico de maquinaria. Los suelos agregados son más resistentes que los no agregados. Los factores que afectan la resistencia de los agregados del suelo son el contenido de agua, textura, tipo de arcilla, contenido de materia orgánica y tamaño de los agregados (Hartge y Horn. 1984; Horn y Dexter, 1989; Horn et al, 1995; citado por Lal, 2004).

3.5.2 Hidrofobicidad de los agregados

Un material se considera hidrofóbico o repelente al agua, cuando el agua no se extiende sobre su superficie, es decir, cuando el ángulo que se forma entre la superficie del agua y la superficie del sólido es mayor o igual a 90º (Jaramillo, 2004).

Existen varias propuestas para considerar que un suelo es repelente al agua, King (1981) citado por Jaramillo (2004) apunta a que un suelo arenoso y seco al aire empieza a presentar dificultad para ser humedecido cuando una gota de agua colocada en su superficie, tarda mas de 10 segundos en ser absorbida por él. Otros autores como Doerr *et a,l* (2000) citados por Jaramillo (2004), han propuesto que se considere el suelo como repelente al agua cuando la gota de agua colocada en la superficie tarde respectivamente mas de 60 segundos en ser absorbida.

Finalmente Richardson, en 1984, citado por Jaramillo (2004), propuso que el suelo se considere repelente al agua si dicha gota tarda más de 5 segundos en ser absorbida completamente por él.

3.6 Factores que afectan la agregación

Existen numerosos factores que afectan la agregación y pueden clasificarse en exógenos y endógenos. Los endógenos son aquellos dados por las propiedades inherentes del suelo; están incluidos allí características como textura, mineralogía de arcillas, naturaleza de los cationes intercambiables, cantidad y calidad de la fracción humita. Los factores exógenos que afectan la estructura del suelo incluyen el clima, procesos biológicos, uso y manejo de la tierra (Hamlin, 1985 citado por Lal, 2004).

3.6.1 Alteración del humedecimiento y secamiento

Las variaciones en la humedad del suelo afectan notablemente los cambios en la agregación y la formación de diferentes tipos de peds. Al secarse los coloides del suelo hacen que este se contraiga y se produce la cementación de las partículas.

El volumen del suelo que se moja aumenta su volumen después de secado. Este aumento de volumen es permanente después de la completa deshidratación y se debe a la entrada del aire en la masa terrea, aire que permanece ocluido en el espacio de los poros. La deshidratación de la masa del suelo no puede ser uniforme, especialmente si el secamiento es rápido. La consecuencia es que se producen en la masa de tierra tensiones desiguales que dan origen a la formación de terrones (Lal, 2004).

Si el agua entra con rapidez, el aire comprimido dentro de los poros es sometido a una presión, la cual hace estallar el agregado al romper los enlaces de cementación, por el contrario si el agua entra lentamente por capilaridad se minimizan los riesgos de destrucción de agregados (Yoder, 1936; Henim, 1938 citado por Lal, 2004). Dependiendo de los mecanismos de secado y humedecimiento se producen los diferentes tipos de peds (granulares, paralelepidedos, blocosos, prismáticos o en placas).

3.6.2 Coloides de hierro y Aluminio

Existe una relación muy estrecha entre la cantidad de hierro “libre” y la cantidad de agregados estables en el agua. El hierro puede tener dos funciones en la agregación. La parte que está en solución puede actuar como agente floculante, y la otra parte, que es más gelatinosa, puede ejercer una acción cementante. La importancia del sesquióxido de hierro con el humus en la formación de agregados estables ha sido destacada por varios investigadores (Tiulin y Korovkina, 1950; Beutelspacher, 1955; Filippovich, 1956; Alexsandrova y Nad’, 1958 citado por Baver, 1972). El hidróxido férrico coloidal hidratado se adhería a los minerales de arcilla y no podía ser eliminado mecánicamente. Al mezclar oxido férrico hidratado y acido húmico en un sistema de arcilla limosa, se forman agregados muy estables (Walter, 1965 citado por Baver, 1972). El envejecimiento de la mezcla no

solo aumenta la estabilidad de los agregados si no también la cantidad de los mismos (Saini y Mc Lean, 1956 citado por Baver, 1972).

3.6.3 Enmiendas

La adición de materia orgánica (Compost, residuos de cosecha, lodos) tiene un efecto benéfico sobre la estructura del suelo a través de la formación de complejos arcillo-orgánico (Greenland, 1965 a:b; Glass, 1995 citado por Lal, 2004). De forma similar la aplicación de $CaSO_4$ se impide la dispersión en suelos alcalinos.

3.6.4 Efectos de la materia orgánica

La materia orgánica es conocida por tener una estrecha relación con la formación y estabilización de agregados. (Tisdall and Oades, 1982). Baver (1935) encontró una correlación positiva entre el porcentaje de carbono y los agregados mayores de 0.05 y 0.1 mm. Se ha encontrado que la materia orgánica poduce más cementación por unidad de masa que la arcilla (Black, 1975). Demolon y Hénin (1932), citados por Baver et al. (1972), encontraron que agregando a un sistema de arena de cuarzo, humus coloidal o arcilla coloidal en cantidades iguales se produjo una agregación de 82,5% con el humus y de 31% con la arcilla. La arcilla y los coloides orgánicos causan la mayor parte de la agregación del suelo, esto sugiere la posibilidad de la existencia de interacciones entre el material coloidal mineral y el orgánico para formar complejos arcillo-orgánicos.

3.6.4.1 Acción de los productos de la síntesis producida por los microorganismos

La naturaleza de estos productos ha sido investigada por muchos autores. El principal papel se lo atribuye a los polisacáridos (Baver et al. 1972, Black, 1975). Las grandes y flexibles moléculas de los polisacáridos tienen gran número de

grupos OH, y diverso contenido de grupos amina, carboxilo, fenol y otros. Estos se producen en gran cantidad y rápidamente, cuando los deshechos vegetales son degradados por la microbiología del suelo, pero con la misma velocidad con que son producidos, también son degradados. Pueden considerarse productos transitorios en el ciclo de la materia orgánica, dependiendo su velocidad de producción y descomposición de las condiciones ecológicas que afectan la actividad microbiana y de las características de los restos vegetales.

Los polisacáridos son adsorbidos en las superficies de las arcillas. En las montmorillonitas la adsorción se produce en las superficies externas e internas. Las posiciones con grupos carboxilo, no se unen en los planos basales, sino en los bordes. Esto se da especialmente en los minerales arcillosos 1:1. La energía de adsorción depende mucho de la flexibilidad de las moléculas, ya que ella determina el número de puntos de contacto. La unión se hace a través de puentes de hidrogeno entre los hidrógenos de los grupos funcionales del polímero orgánico, y los oxígenos de los planos basales de los cristales de los minerales arcillosos. También intervienen fuerzas de Van der Waals que son las fuerzas atractivas o repulsivas entre moléculas. Además los cationes intercambiables actúan como puente entre los polisacáridos y las arcillas.

3.6.4.2 Acción de los productos de la descomposición

Los ácidos húmicos son productos muy estables de la descomposición biológica de la materia orgánica. Son mezclas de polímeros de alto peso molecular, siendo su unidad básica un núcleo aromático (fenólico o quinónico) al que se unen cadenas alifáticas (poliurónidos, polisacáridos, péptidos). El peso molecular es alto en general, pero crece muchísimo con el grado de polimerización. La importancia relativa de los núcleos aromáticos y de las cadenas alifáticas también varía en estos compuestos. En los ácidos fúlvicos, la importancia de las cadenas alifáticas

es mayor que la de los núcleos aromáticos y la situación se revierte completamente en los ácidos húmicos grises.

Swaby (1949), citado por Baver *et al*. (1972), indican la posibilidad de atracción polar entre los compuestos orgánicos y las fracciones minerales especialmente con la fracción arcilla, con la que forma complejos muy estables. Este enlace se produce entre los grupos OH, NH2, y COOH y las arcillas, cuyas superficies están cargadas negativamente. Para que se produzca la unión sería fundamental la ocurrencia de deshidratación, es decir, una estación seca. Los ácidos húmicos y los polisacáridos mencionados como productos de la síntesis, ocuparían el lugar del agua en las intercapas. También se dan uniones en los bordes de fractura de los cristales de arcilla. Si bien Baver *et al.* (1972) señalan que sería imposible la unión polar entre los ácidos húmicos y los cristales de arcilla dada la carga neta negativa de ambos coloides, Beutelspacher (1955) encontró evidencias de que son adsorbidos en sitios con carga positiva.

También se dan uniones tipo H y por fuerzas de Van der Waals, pero el mecanismo de unión más probado es a través de cationes polivalentes que actúan como puente, tal los casos del Ca^{++}, Al^{+++} y Fe^{+++} (Evans y Russell, 1959; Black, 1975), o hidróxidos y óxidos de Fe^{+++} y Al^{+++}, cumpliendo la misma función dada su carga positiva (varios autores citados por Baver et al., 1972). En todos los casos, se indica que la C.I.C. de los complejos arcilla-humus es menor a la que resulta de adicionar por separado la de la materia orgánica y la arcilla. La explicación reside en que la interacción química que se da entre los coloides al unirse, particularmente a través de cationes o coloides positivos, anula posiciones de intercambio. Además hay evidencia de bloqueo estérico de posiciones de intercambio (Evans y Russell 1959 cit. por Black, 1975). El efecto de estos productos en la estructura es muy duradero.

3.5.6.3 Acción de los tejidos microbianos

Tienen un efecto directo en la estructura por medio de los productos de sus actividades de síntesis y descomposición. Esto es fácilmente visualizable en el caso de los hongos, cuyos tejidos filamentosos (micelios) forman una red alrededor de las partículas del suelo uniéndolas. Según Martín (1945) citado por Baver et al. (1972), el 50% del efecto sobre la estabilidad estructural que es producido por los hongos, se debe a la acción mecánica de sus micelios. En cambio, sólo el 20% del efecto de las bacterias se debe a la acción mecánica de sus células. Según una serie de autores citados por Baver et al. (1972) el efecto global de los hongos es más importante que el de las bacterias, excepto en condiciones anaeróbicas.

También se ha encontrado que luego de la incorporación de restos vegetales al suelo (sin lo cual no se producen ni efectos directos ni indirectos), las bacterias actúan antes que los hongos. El efecto directo se produce antes, y también termina antes que el de los productos de síntesis.

3.7 Estabilidad estructural

Es la habilidad de los agregados para conservar su forma cuando se humedecen. El término estabilidad estructural describe la capacidad de un suelo de mantener el arreglo de su fase sólida y gaseosa cuando es expuesto a diferentes tipos de estrés (eje: labranza).

Los agregados resistentes al agua permiten una mayor velocidad de infiltración y son más resistentes ante la erosión. Los agregados no resistentes forman costras en la superficie del suelo.

La inestabilidad de los agregados se debe principalmente al tipo de arcilla (las expandibles forman agregados más inestables), a la naturaleza de los productos de la descomposición de la materia orgánica, a los cationes asociados con los coloides (el exceso de sodio provoca dispersión de las partículas) y a la naturaleza de la floculación microbiana (los micelios y las sustancias gomosas producidas por las bacterias favorecen la agregación) (Kay 1994).

3.8 Microscopia de suelos: micromorfografía y micromorfología

La microscopía es un método de estudio de muestras de suelos no perturbadas con la ayuda de técnicas microscópicas (y en ocasiones, ultramicroscópicas), con objeto de identificar sus constituyentes, determinar sus mutuas relaciones en espacio y tiempo, e interpretar sus condiciones de formación.

Especial cuidado ha de tenerse para que durante la fase de muestreo, transporte y obtención de las láminas delgadas (preparaciones microscópicas) no se produzca ninguna deformación de la muestra de suelo. Para poder realizar un estudio microscópico del suelo se necesita una preparación de la muestra, que conserve la estructura del suelo inalterada, y un microscopio petrográfico. La micromorfografía se define como la técnica de descripción de las características que muestra el suelo a nivel de microscopio, mientras que la micromorfología utiliza estas características para hacer interpretaciones, generalmente sobre los procesos de formación de los suelos. La micromorfología es el estudio de las secciones delgadas de suelos utilizando el microscopio polarizante; constituye así, una ayuda fundamental para conocer su génesis y evolución, su caracterización morfológica primaria, sus características físicas esenciales y, en algunos casos, para su ubicación taxonómica. La caracterización micromorfológica permite conocer íntimamente la composición del suelo al observar, medir, constatar e

interpretar los fenómenos que se producen o se han producido en él (Dorronsoro, 2002; Stoops, 1998).

3.8.1 Agregación

Como es sabido, los constituyentes elementales del suelo (arenas, limos, arcillas, materiales orgánicos, etc) no se presentan aislados sino que se encuentran unidos entre sí dando agregaciones. Estos agregados son observables a nivel macromorfológico, directamente en el perfil del suelo, en el campo, pero pueden ser analizados de una manera mucho más exhaustiva en el microscopio.
La agregación edáfica se describe con base a: los tipos de agregados, huecos y microestructuras. A continuación se describen estas estructuras, (Figura 2).

1. **Tipos de Agregados**

Granulares. Agregados no porosos de formas con tendencias esferoidales.

En bloques angulares. Agregados constituidos por caras, más o menos planas, que al cortarse forman aristas y estas a su vez originan vértices. En definitiva, presentan formas parecidas a poliedros geométricos irregulares. Las caras de los agregados encajan bien con las caras de los agregados vecinos.

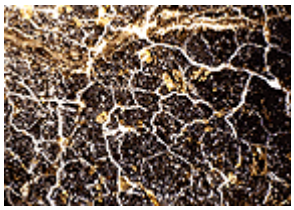
En bloques subangulares. Similares a los anteriores pero los bloques se encuentran menos definidos. Las caras no son tan planas, las aristas son romas y apenas hay vértices. Los agregados tampoco encajan tan bien como en la microestructura de bloques angulares.

Prismáticos. Bloques angulares, a manera de prisma, en los que predomina una dimensión (la vertical) con respecto a las otras dos. Normalmente son demasiado grandes como para poderlos observar en el microscopio.

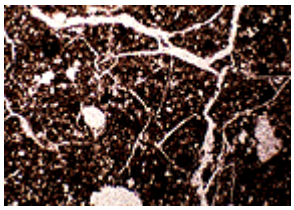
Laminares. Agregados de forma hojosa en los que una dimensión es mucho más corta (la vertical) que las otras dos.

Tipos de agregación

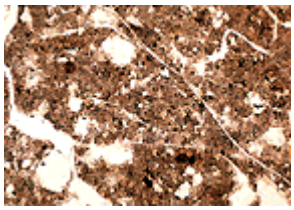
En función de su grado de desarrollo



Fuertemente desarrollados

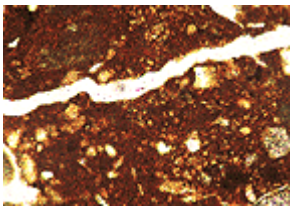


Moderadamente desarrollados

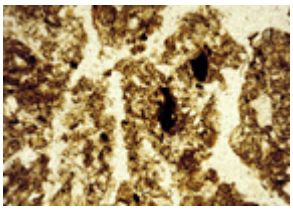


Débilmente desarrollados

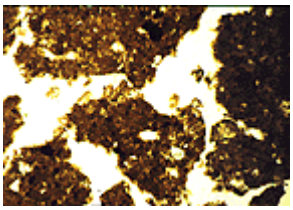
En función de su grado de acomodación



Acomodados



Parcialmente acomodados



No acomodados

Figura 2. Tipos de agregados en función de su grado de desarrollo y acomodación (Tomado de Dorronsoro, 2002)

3.8.2 Edaforrasgos

El término edaforrasgos es definido como unidades de contextura discretas presentes en suelos y reconocibles del material adyacente por una diferencia en concentración en uno o más de sus componentes, (por ejemplo, una fracción granulométrica, materia orgánica, cristales, componentes químicos) o por una diferencia en la contextura interna. Las contexturas de birrefringencia quedan excluidas del concepto de edaforrasgos (Dorronsoro, 2002).

Realmente, en la mayoría de los casos son reorganizaciones de los materiales del suelo que no pueden ser atribuidas a una herencia del material original. En la siguiente tabla se muestran las características necesarias para que se presenten edaforrasgos (tabla 1).

Material de los suelos = Masa basal + Edaforrasgos

Tabla 1. Características diferenciales de los edaforrasgos (Dorronsoro, 2002)

Son edaforrasgos	No son edaforrasgos
Revestimientos de arcilla	Fragmentos de roca
Revestimientos de materia orgánica	Fragmentos de raíces
Nódulos de hierro	Granos minerales

Descripción de edaforrasgos

Los edaforrasgos se describen de acuerdo a las siguientes características: naturaleza, tamaño, forma externa, rugosidad de la superficie, contextura interna, contraste con el material adyacente y tipo de límite, abundancia, variabilidad, distribución y orientación (Dorronsoro, 2002).

Clases de edaforrasgos según Dorronsoro, 2002

1. Clasificación morfológica

De acuerdo con su morfología, cristalinidad y modelos de orientación referida, se pueden distinguir los siguientes tipos:

- **Revestimientos**
- Hiporrevestimientos
- Cuasirrevestimientos
- Rellenos
- Cristales e intercrecimientos de cristales
- Nódulos
- Intercalaciones

2. Clasificación por su naturaleza

De acuerdo con la naturaleza del material se pueden distinguir seis grupos principales: texturales, empobrecimientos, cristalinos, amorfos y criptocristalinos, contextura, excretales y compuestos**.**

Los edaforrasgos se describen por su naturaleza y su morfología, por ejemplo: revestimientos texturales de arcilla, nódulos cristalinos de carbonatos, etc.

Revestimientos

Se definen por su composición y por la superficie que recubren. Recubren una superficie natural del suelo: las paredes de los poros, la superficie de los granos y la de los agregados. No están superpuestos a la masa basal (no son impregnaciones) y tienen límites netos.

Son de naturaleza muy diversa: de arcilla, carbonatos, yeso, compuestos de hierro y manganeso y compuestos orgánicos (Dorronsoro, 2002).

3.9 Composición de la vinaza

La vinaza por ser de origen de la caña de azúcar esta compuesta de materiales orgánicos y nutrientes minerales que hacen parte de compuestos vegetales como aminoácidos, proteínas, lípidos, ácidos diversos, enzimas, bases, ácidos nucleicos, clorofila, lignina, quinonas, ceras, azúcares y hormonas. La naturaleza de forma normal descompone estos materiales en procesos microbiológicos y recicla los elementos minerales, lo que hace lógico pensar que su destino final de la vinaza deba ser su regreso al suelo. La vinaza, resultante de la destilación de melaza fermentada, tiene una composición elemental interesante y contiene todos los componentes del vino que han sido arrastrados por el vapor de agua así como cantidades de azúcar residual y componentes volátiles. De manera general, los constituyentes son los siguientes: (García y Rojas, 2005)

- Sustancias inorgánicas solubles en las cuales predominan los iones K^{+}, Ca^{++} y $SO4^{-}$.
- Células muertas de levaduras.
- Sustancias orgánicas resultantes de los procesos metabólicos de levaduras y microorganismos contaminantes.
- Alcohol y azúcar residual.
- Sustancias orgánicas insolubles.
- Sustancias orgánicas volátiles.

En el año 2004 en el Valle del Cauca se estimaba que la producción de alcohol para el año 2005 sería cerca de 1350000 litros por día que generarían vinazas con contenidos de sólidos totales entre 32,5 y 55% en cantidades aproximadas a 1.894.500 litros por día (Quintero, 2004). En el año 2006 la producción en las

destilerías del Valle de Cauca fue de 939.000 litros de alcohol por día y 428.295 m^3 de vinaza por año en concentraciones de 22 a 60% de sólidos totales (Cenicaña 2006 citado por CIAT - CLAYUCA, 2007).

La composición química de la vinaza es muy variable y depende de las características de la materia prima, del sustrato, del tipo y la eficiencia de fermentación y destilación, como también de la variedad y la maduración de la caña (García y Rojas, 2006). La materia orgánica es el principal constituyente y entre los minerales, el potasio, en conjunto con el calcio, son los más abundantes, es rica también en nitrógeno, azufre y normalmente pobre en fósforo (Tabla 2).

Tabla 2 Composición elemental de las vinazas de 55% y de 10% de sólidos totales

Composición	Vinaza 55%	Vinaza 10%
N	4.3 Kg/m^3	0.63 – 1.4 Kg/m^3
P	0.22 Kg/m^3	0.04 – 0.11 Kg/m^3
K	34.03 Kg/m^3	4.05 – 9.01 Kg/m^3
Ca	5 Kg/m^3	0.74 – 2.2 Kg/m^3
Mg	5.4 Kg/m^3	0.80 – 1.36 Kg/m^3
S	11.55 Kg/m^3	1.28 Kg/m^3
pH	4.3-4.5	3.5-4.3
CE	17 DS/m	11 DS/m

Fuente: Garcia y Rojas, 2006

En Colombia a partir de una tonelada de caña procesada se producen aproximadamente 800 litros de vinaza (Korndörfer et al., 2004). Dadas las altas cantidades de vinaza generadas, se empezó a investigar acerca de nuevas aplicaciones en pro del aprovechamiento de sus propiedades fisicoquímicas. Recientemente, los fabricantes de alcohol han estado considerando la vinaza para diversos procesos: Fabricación de fertilizantes mediante compostaje; como fuente de potasio previa concentración por evaporación hasta al menos 60 grados Brix; y como fuente energética vía incineración (Medina y Rivera, 2003 citado por Goyes y Bolaños, 2005). Algunos de los usos propuestos de la vinaza se describen en la tabla 3, destacándose su uso como fuente fertilizante suplementando calcio,

potasio, M.O, sulfatos y micronutrientes; además es usada como sustrato para compost, producción de biogas y biosólidos y suplemento alimenticio entre otros.

Tabla 3 Resumen de usos de la vinaza

Usos	Que aporta	Que hace	Observaciones
Fertilización (Es el uso mas ampliamente conocido)	• Materia orgánica • Potasio • Calcio • Sulfatos • Micronutrientes	Fomenta la reproducción de microorganismos en el suelo. Aporte de nutrientes disponibles	Se puede aplicar con equipos especiales o directamente con el agua de riego.
Sustrato para compost		Sirve como fuente de energía y nutrientes a los microorganismos que componen el material vegetal residual de las cosechas.	El exceso de V60 en la mezcla da lugar a detención del proceso de compostaje debido a que por la DBQ elevada interfiere negativamente en la degradación del material vegetal.
Producción de Biogás y Biosólidos		Al descomponerse la materia orgánica en un reactor anaerobio, se genera biogás con contenidos utilizables de metano, gas carbónico y acido sulfhídrico. También se producen biosólidos ricos en C, N y S asimilables por las plantas.	Se deben controlar las concentraciones de acido sulfhídrico ya que se producen malos olores y deteriora las tuberías de recuperación del gas.
Medio de Cultivo		Suplementada con Urea y Sacarosa en un excelente sustrato para promover el crecimiento de levaduras, algas del genero Chlorella, bacterias como Pseudomonas y Methanomonas y hongos filamentosos.	La proteína unicelular es aquella que proviene de bacterias, algas y hongos y se constituye en una importante fuente de proteínas para la alimentación animal y humana.
Suplemento alimenticio	Proteína 5,68% m/m Energía Neta 0,88 Mcal/kg Sales minerales	Mezcla con otros elementos para elaborar concentrados para animales. Sustituye parte de la melaza usada en la suplementación de ganado bovino, porcino y conejos.	En bovinos dosis de potasio superiores a 1,5 kg/animal causan efectos laxantes.
Incineración	Poder calorífico 1871 cal/g limite superior 1621 cal/g limite inferior	Se constituye en un buen combustible para incinerar y generar energía térmica para distintas aplicaciones.	Actualmente existen dos calderas en Tailandia operando con este combustible.
Otros	Agente plastificante de concretos reforzados. Fabricación de ladrillos. Materia prima para obtener sulfatos de cloruro y potasio, potasa y carbonato de sodio, acido glutámico y glutamina vía fermentativa.		

Fuente: García y Rojas, 2006.

3.8.1 Estudios sobre aplicación de vinazas a los suelos

En investigaciones realizadas en Brasil, se evaluaron los efectos de la aplicación de dosis crecientes de vinaza en un Oxisol arcilloso. No se encontraron alteraciones de la arcilla dispersada en agua de la capa superficial, aumentó la actividad microbiológica y con ello la excreción de mucílago el cual estimuló la agregación de las partículas, no se afectó la densidad real y ni la porosidad total, aumentó la capacidad de infiltración en el suelo y alteración de los colores del suelo. También se presentó un aumento generalizado de cationes intercambiables, al igual que un aumento sensible del pH y la aplicación de dosis bajas (100 m3 /ha) no alcanzó valores peligrosos de C.E (Camargo, 1983). Resultados similares encontraron Da Silva y Oliveira, (1987), cuando se aplicó vinazas en suelos cultivados con caña de azúcar.

En Grecia se evaluó el efecto de aplicar vinaza en el agua de riego a un suelo arcilloso cultivado en trigo, encontrando que: aplicaciones de vinaza en sitios a cierta profundidad por fuera del límite permisible causa efectos negativos en el suelo; se incrementaron el Na^{+} y el Mg^{++}, no produciendo niveles tóxicos; se observaron aumentos de K^{+}; aplicaciones cada 3 o 4 años evitaron efectos negativos en suelos y cultivos; la aplicación de vinaza permitió la sustitución exitosa de fertilizantes químicos en el cultivo de trigo (Gemtos, *et al*, 1999).

En Brasil se realizaron continuas aplicaciones de vinaza en un Ultisol, y se encontró que ocasiona la saturación de la dilución de carbono orgánico y el aumento de sus lixiviados, presentándose la posibilidad de la contaminación de las aguas subterráneas. La absorción de vinaza se incrementa dependiendo del tipo de arcilla en el siguiente orden: caolinita>hematina>gestita (Benke, et al., 1999).

Tejada (2006) realizó varios estudios, aplicando vinazas de remolacha compostada y fresca en suelos de España bajo condiciones áridas. En uno de sus experimentos aplicó vinazas durante cuatro años y encontró que la aplicación de vinaza fresca disminuyó la estabilidad estructural del suelo, mientras que cuando la vinaza aplicada era compostada, la estabilidad estructural se incrementó; en un Xerollic Calciorthid el autor encontró que la aplicación de altas dosis de vinaza de remolacha, afectó negativamente la estructura del suelo y concluyó que los principales agentes cementantes que causaron la desestabilización fueron los ácidos fúlvicos y el sodio contenido en la vinaza; En un Tipyc Xerofluent, realizó aplicaciones de vinaza fresca, encontrando un deterioro las características físicas de los suelos y un incremento en la pérdida de suelo. También se presentó aumento de cationes monovalentes (Na^+), ácidos fúlvicos y se desestabilizó la estructura del suelo.

Madejon, *et al*, (2000) realizaron aplicaciones repetidas y en cantidades moderadas de 3 vinazas compostadas de remolacha azucarera en un Cambisol. Se presentaron efectos positivos en el contenido de materia orgánica, sustancias húmicas, contenido de Nitrogeno y CIC. No se presentaron problemas de salinización y sodificación.

En el mismo país, Terum, *et al* (2006) realizó un experimento adicionando residuos de caña de azúcar y vinazas en un Alfisol. Encontrando una relación de dependencia de los microorganismos con respecto a la fuente de carbono en suelo adicionado con paja de caña de azúcar y vinaza. Aumentaron la producción de CO2 y las actividades de la CM-celulaza, favoreciendo la mineralización del carbono orgánico propiciando fuentes de energía y de carbono asimilable.

En una investigación reciente realizada la India A.K. Biswas *et al* (2009), aplicaron desechos de la destilería de alcohol en un *Vertisol* cultivado con soya y trigo, y durante cinco años midieron los cambios en la estabilidad estructural a una profundidad de 15cm. Encontraron un aumento en el diámetro ponderado medio (DPM), en el contenido de Carbono Orgánico y obtuvieron mejores rendimientos en los cultivos, en los tratamientos en los cuales la dosis de desechos aplicada fue mayor.

3.8.2 Estudios sobre aplicación de vinazas a los suelos del Valle del Cauca

Montenegro en el 2008 evaluó para dos tipos de suelos bajo condiciones de invernadero el efecto de la aplicación de vinaza sobre la presencia, actividad y biomasa microbiana en el cultivo de maíz dulce (Zea Mays). Aplicó 4 mezclas de potasio (T1-100% KCl, T2-100% vinaza, T3- 50% KCl +50% vinaza, T4-25% KCl +75% vinaza) y realizó cuatro muestreos (0, 28, 61, 79 días) para evaluar la evolución en la dinámica microbiana antes y después de fertilizar. Los resultados obtenidos en la presencia, actividad respiratoria y biomasa microbiana-C presentaron diferencias significativas entre muestreos y por efecto de los tratamientos. La respuesta de cada suelo fue diferente en la dinámica microbiana y en la acumulación de biomasa de las plantas, sugiriendo que los resultados obtenidos dependen de las características iniciales de cada suelo, tipo de cultivo y manejo del mismo. Además evaluó el cambio en algunas propiedades físicas pasados 79 días después de la aplicación de la vinaza y el diámetro medio ponderado y la conductividad hidráulica disminuyeron en todos los tratamientos.

Narváez en el 2008, realizó un experimento en el Invernadero de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Palmira donde se investigó el efecto de la aplicación de vinazas sobre la actividad de los enzimas fosfatasas y deshidrogenasas y la biomasa vegetal, en dos suelos del Valle de Cauca, localizados en Florida y en el

Ingenio Manuelita (Palmira), clasificados como Typic Argiudoll con intrusiones Entic Dystropept y Fluventic Haplustoll, respectivamente, sembrados con maíz dulce (*Zea mays* L.). Se aplicaron 4 tratamientos: Vinaza, KCl y en proporciones de 50:50 y 75:25. Durante 76 días se estimaron algunas propiedades fisicoquímicas y biológicas de los suelos, antes de la aplicación de los tratamientos y en diferentes estados de desarrollo del cultivo. Se evaluaron la densidad aparente, la textura, la estabilidad de agregados, la porosidad total, el pH, la CIC, el porcentaje de materia orgánica, macro y micronutrientes, el fósforo, las fosfatasas alcalinas y ácidas, las deshidrogenasas y la biomasa seca. Los análisis estadísticos indicaron que el pH, el K^+, el B^+ y la relación Ca+Mg/K fueron afectados significativamente por los tratamientos y su respuesta varió de acuerdo con el tipo de suelo. En ambos suelos, el pH y la relación Ca + Mg/K disminuyeron significativamente, mientras que los contenidos de K^+ y B^+ se incrementaron. En el suelo de Florida, el P y el Cu aumentaron y en Manuelita el Na^+ y el Fe^{++} se incrementaron sin alcanzar niveles tóxicos. El Fe^{++} se incrementó significativamente con la aplicación de vinaza. En Florida, la densidad aparente disminuyó y en Manuelita se incrementó, disminuyendo la porosidad y el movimiento del agua en el suelo. Las fosfatasas ácidas presentaron su máxima actividad a los 38 días después de siembra (DDS) del maíz y no hubo diferencias entre los suelos. Las fosfatasas alcalinas se incrementaron a los 10 DDS y fueron mayores en Manuelita. La mayor actividad de deshidrogenasas ocurrió en el suelo de Florida, esta enzima mostró la existencia de problemas de aireación y de actividad metabólica en el suelo de Manuelita. La biomasa vegetal (parte aérea) fue significativamente mayor en el suelo de Florida. Los resultados señalan la existencia de respuestas diferentes dependiendo del tipo de suelo y la importancia de estudiar las particularidades de la respuesta de los suelos a la aplicación de la vinaza.

Rojas 2008, estimó los cambios en la conductividad hidráulica saturada mediante las técnicas de “Caída de carga” y “Fuente localizada de agua” en un Typic

Ustisament con dosis diluidas de vinazas. Encontró que no hubo diferencias significativas entre los métodos empleados en la determinación de la conductividad hidráulica saturada promedio, la cual se redujo en forma exponencial al incrementar la concentración de vinaza. Los resultados encontrados indicaron una reducción de la conductividad hidráulica del 50% para una concentración de vinaza de 2º Brix en un suelo arenoso, 5.3º Brix en el suelo franco arenoso y 6.1º Brix en el suelo franco arcilloso.

4. MATERIALES Y METODOS

4.1 Localización

El estudio se realizó con un Fluventic Haplustoll (IGAC y CVC, 2004) proveniente de La Hacienda Gertrudis Lote 105 en el Ingenio Manuelita (Figura 3), localizado a 3º 35’ 51.1’’N y 76º 16’ 8.9’’ W, ubicado a una altura 1049 msnm.

Para la realización de la etapa experimental las muestras de suelo fueron llevadas al invernadero de la Universidad Nacional de Colombia, municipio de Palmira, Valle del Cauca, localizado a 3º 30’ 45,6’’ N y 76º 18’ 29.911’’ W, ubicado a una altura de 950 m.s.n.m., con temperatura media de 24 ºC y HR del 60%.

4.2 Diseño experimental

Las unidades experimentales se organizaron bajo un diseño completamente al azar conformado por cuatro tratamientos, cinco repeticiones y tres muestreos para un total de 60 unidades experimentales previamente aleatorizadas.

4.3 Conducción del experimento

Los tratamientos relacionados en la tabla 4, fueron aplicados a cada unidad experimental. Se realizaron muestreos destructivos en el segundo, cuarto, y sexto mes después de la aplicación de la vinaza (mdda). Durante el tiempo del experimento se aplicaron 30 mm de agua semanalmente a cada una de las muestras, tratando de mantener el régimen hídrico de campo. Se tomaron submuestras para llevar a cabo cada uno de las pruebas de laboratorio.

Tabla 4 Tratamientos planteados en el experimento

Tratamiento	Vinaza 23% (Kg*ha-1)	Meses de muestreo después de la aplicación
1	5.000	2 4 6
2	10.000	2 4 6
3	15.000	2 4 6
4	0	2 4 6

4.4 Descripción de las Unidades experimentales

Cada unidad experimental correspondió a una muestra indisturbada de suelo; estas se obtuvieron empleando anillos bicelados de PVC con una altura de 10 cm, diámetro 16,83 cm y espesor de 4,12 mm; los cuales fueron enterrados hasta una profundidad de 5cm, y con ayuda de un palín se retiraron nuevamente evitando al máximo la alteración de la muestra. Estas fueron cuidadosamente empacadas y transportadas al invernadero de la Universidad Nacional de Colombia sede Palmira, para el establecimiento del experimento (Figura 4).

Figura 3 Recolección y empaque de las muestras de suelo

4.5 Variables respuesta y metodología empleada para su determinación.

Se estimaron variables físicas y químicas del suelo. Las propiedades estimadas se describen en la Tabla 5. Las metodologías de laboratorio empleadas en la determinación de las variables respuesta se describen en el anexo 1.

Tabla 5 Descripción de las variables evaluadas en los suelos de estudio y metodología empleada para su determinación

Propiedad	Parámetro	Metodología
Física	Densidad aparente	Núcleo (Malagon y Montenegro, 1990)
	Textura	Pipeta (Malagon y Montenegro, 1990)
	Porosidad total	Cálculo matemático
	Estabilidad de agregados	**1.** Yoder (Malagon y Montenegro, 1990) **2.** Distribución de agregados (Malagon y Montenegro, 1990)* **3.** Resistencia a una fuerza de impacto (Metodología experimental en prueba de la Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira, 2009) * **4.** Compresión inconfinada del suelo (Skidmore y Powers, 1983)*
Químicas y mineralógica	pH	Potenciómetro (1:1) (Motta et al., 1990)
	CIC	Acetato de amonio pH 7 (Motta et al., 1990)
	% MO	Walkey y Black (Motta *et al*., 1990)
	Macro y micronutrientes	Espectrofotometría de Absorción Atómica (Motta *et al*., 1990)
	Fósforo	Bray II y Olsen (Motta et al., 1990)
	Mineralogía de Arcillas	Difracción de rayos X

Los análisis se realizaron en los laboratorios de Química y Física, de la Universidad Nacional de Colombia sede Palmira, en el laboratorio de suelos del Instituto Geográfico Agustin Codazzi Bogota y en el laboratorio de Ingeniería de Cenicafé Chinchiná.

* El estado de humedad de las muestras de suelo empleadas en estas determinaciones era la higroscópica, no se emplearon muestras en estado friable puesto que estos eran métodos experimentales en donde se pretendía simplemente establecer una comparación entre tratamientos.

4.6 Análisis de resultados

A los resultados obtenidos se les realizo análisis de varianza (ANOVA) y en aquellos casos que se presentaron diferencias se aplicó prueba de Duncan con un nivel de significancia del 5%. El paquete estadístico utilizado fue SAS (2008).

5. RESULTADOS Y DISCUSION

5.1 Caracterización del suelo

A continuación se presenta una descripción de las pruebas químicas, físicas y mineralógicas realizadas al suelo al inicio de la investigación.

5.1.1 Propiedades químicas

En la Figura 5 se recogen las características químicas iniciales y su variación en el tiempo con la aplicación de los diferentes tratamientos para el *Fluventic haplustoll*, de igual forma en la figura 5 se presentan gráficos de los promedios encontrados para algunos elementos de acuerdo con los tratamientos aplicados.

El suelo presento un pH de 7,9 clasificado como medianamente alcalino (IGAC, 2008). La materia orgánica inicial fue de 2,7%, no varió entre los diferentes muestreos, pero entre tratamientos se encontraron diferencias altamente significativas según ANOVA ($P < 0.001$) (Anexo 2) y la prueba de promedios mostró que a medida que se incremento la dosis de vinaza aplicada, el contenido de M.O también lo hizo (Anexo 3) (figura 5). Estos porcentajes se consideran como medios ya que se encuentran en el rango de 2 a 4% en clima calido (IGAC, 2008). Esta tendencia esta de acuerdo con lo encontrado por Madejon, et al (2001) y Narváez (2008), quienes observaron la aplicación de vinaza a los suelos, incremento el contenido de M.O, posiblemente influenciado por el tipo de materiales presentes en la vinaza.

El contenido de Ca^{++} fue alto (Sociedad Colombiana de la Ciencia de Suelo, 1990, 2001). Se encontraron diferencias altamente significativas entre tratamientos

(Anexo 4) y la prueba de promedios (Anexo 5) mostró que en el tratamiento donde no se aplico vinaza fue diferente de los demás y presento el menor contenido con un valor de 15,8 cmol*Kg^{-1} frente a 36,69 cmol*Kg^{-1} obtenido en el tratamiento donde se aplico 15.000 Kg*ha-1 de vinaza. Los incrementos de Ca^{++} y M.O son especialmente importantes para la estructuración del suelo dado que cationes bivalentes como el Ca^{++} crean puentes entre partículas de arcilla y el carbono orgánico del suelo, mejorando la agregación (Bronick y Lal, 2005).

El contenido de Mg^{++} fue alto (Sociedad Colombiana de la Ciencia de Suelo, 1990, 2001). Se encontraron diferencias altamente significativas entre tratamientos (Anexo 6) y la prueba de promedios (Anexo 7)mostró que en el tratamiento donde no se aplico vinaza fue diferente de los demás y presento el menor contenido con un valor de 3,8 cmol*Kg^{-1} frente a 8,95 cmol*Kg^{-1} obtenido en el tratamiento donde se aplico 15.000 Kg*ha-1 de vinaza. El incremento tanto del Ca^{++} como del Mg^{++}se debe posiblemente a que la vinaza aplicada tiene altos contenidos en estos elementos.

El contenido de Na^{+} inicial fue de 0,2 cmol*Kg^{-1} considerado como bajo y se mantuvo así a lo largo del experimento indicando que este es un suelo sin problemas de sodicidad (Agrosagi, 2007), la estabilidad de este elemento en el tiempo se puede explicar dado el bajo contenido de Na^{+} aportado por la vinaza aplicada, este resultado contrasta con el encontrado por Madejon, *et al* (2001) y Gemtos, (1999) en donde el contenido de Na^{+} en los suelos se incremento con la aplicación de vinaza.

El contenido de K^{+} en el muestreo inicial fue de 0.19 cmol*Kg^{-1} considerado bajo, porque no superó el 0.4 cmol/Kg de suelo (ICA, 1992 citado por Castro, 1998). El ANOVA ($P < 0.05$) (Anexo 8) mostró diferencias significativas entre tratamientos y la prueba de promedios (Anexo 9) mostró incrementos cuando se aplicaron las distintas dosis de vinaza, especialmente con la mayor (15.000 Kg*ha^{-1}) con un

valor de 0,47cmol*Kg^{-1}; similares resultados obtuvo Gemtos, (1999) en dos tipos de suelo de Grecia, donde el K^{+} se incremento al aplicar vinaza de remolacha azucarera. El contenido de K^{+} sufrió un incremento especialmente notable con la aplicación de altas dosis de vinaza, este comportamiento es probable debido al bajo contenido de este elemento en el suelo y la alta cantidad aportada con la vinaza, razón por la cual esta es empleada como fuente sustituta en la fertilización potásica (Quintero, 2006).

En cuanto a elementos menores el Fe^{++} mostró un contenido inicial bastante alto (55,4ppm) y se encontraron diferencias altamente significativas entre tratamientos según ANOVA ($P < 0.001$) (Anexo 10), la prueba de promedios (Anexo 11) mostró que el contenido más alto se observo en el tratamiento en el cual no se aplico vinaza. Este resultado no es muy relevante debido a que a altos valores de pH el hierro forma compuestos insolubles como el $Fe(OH)^{3+}$, $Fe(OH)^{-2}$, $Fe(OH)^{4+}$, que son mas insolubles a medida que aumenta la alcalinidad ya que el Fe^{+2} pasa a Fe^{+3}. La aplicación de materia orgánica puede ser un mecanismo efectivo para incrementar la solubilidad del hierro ya que se promueve la formación de Fe quelatado derivado de la MO (Schuertmann y Taylor, 1989).

El suelo mostró un contenido inicial de Cu^{++} de 12,9 ppm, considerado como alto (Agrosagi, 2007), el ANOVA (Anexo 12) revelo que para este elemento existieron diferencias altamente significativas entre tratamientos y la prueba de promedios (Anexo 13) señalo que con la aplicación de vinaza, el contenido de Cu se redujo hasta un valor medio de 1,66 ppm. . Este comportamiento se puede deber a que con el aumento en el contenido de M.O, el Cu^{++} fue retenido por esta, además en suelos con valores de pH alto, se reduce la solubilidad y se incrementa la fuerza con la cual el Cu^{++} es retenido por las arcillas y la materia orgánica, haciéndolo menos disponible.

El contenido inicial de Mn^{++} tuvo un valor de 59,5 ppm considerado como alto (Agrosagi, 2007), no se presentaron diferencias significativas ni entre muestreos ni entre tratamientos, sin embargo se observo un incremento a 65,2 ppm en el tratamiento donde se aplicaron 15.000 Kg*ha-1 de vinaza. Con el valor de pH que presenta el suelo se espera que haya suficiente reservas de Mn3+ en el suelo que los microorganismos son capaces de regular, oxidándolo a Mn4+ o reduciéndolo a Mn2+ y esta ultima es la forma soluble y está disponible para las raíces de las plantas.

El suelo mostró un bajo contenido inicial de B de 0,28 ppm (Agrosagi, 2007), el ANOVA (Anexo 14) reveló que para este elemento existieron diferencias altamente significativas entre tratamientos y la prueba de promedios (Anexo 15) señalo que con la aplicación de vinaza, el contenido de B aumento hasta un valor medio de 0,73 ppm en el tratamiento en el cual se aplicó 15.000 Kg*ha-1 de vinaza. Probablemente con el aumento del contenido de M.O por la aplicación de vinaza, genero un incremento en la adsorción de B, que al mineralizarse esta M.O se convierte en una fuente importante del elemento asimilable por la planta.

El contenido de Zn^{++} presentó incrementos con la aplicación vinaza paso de tener 0,6 a 3,53 ppm, manteniéndose dentro del rango bajo debido a que fueron menores de 4 ppm (Agrosagi, 2007) (Anexo 16). Se presentaron diferencias altamente significativas entre tratamientos (Anexo 17) siendo mayor el contenido del elemento en donde se aplicaron las dosis mas altas de vinaza, indicando que al igual que sucedió con el B, el incremento de M.O aumento la adsorción de Zn, sin embargo en con el valor de pH tan alto del suelo la disponibilidad de este elemento sigue siendo minima.

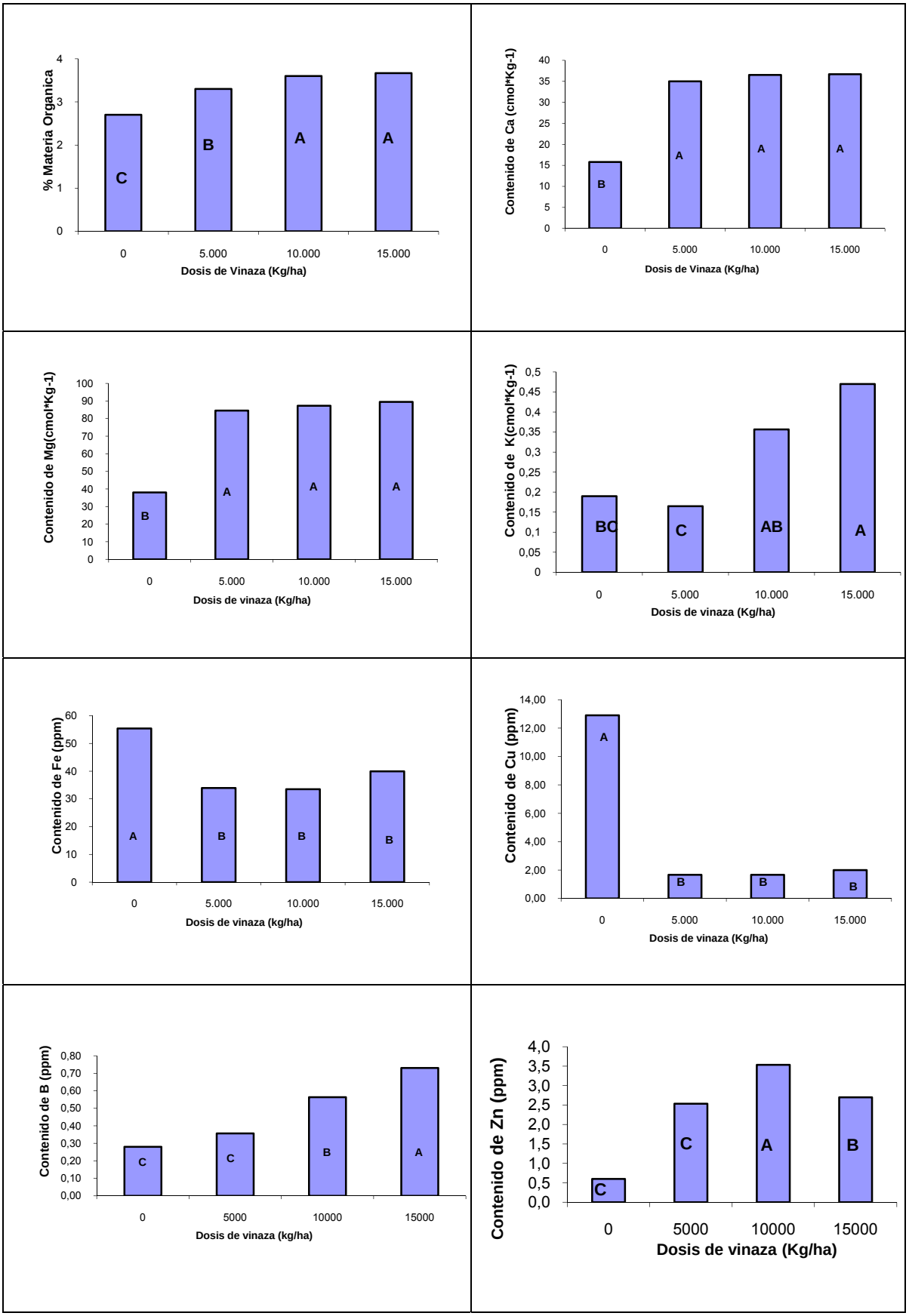


Figura 4 Promedios encontrados de los contenidos de elementos con cada tratamiento. Valores con la misma letra no difieren significativamente (Prueba de Duncan <0,05)

5.2 Propiedades físicas

Los resultados obtenidos en la caracterización física del suelo se encuentran consignados en la tabla 7. De acuerdo con los contenidos de arcilla, limo y arena determinados para el *Fluventic Haplustoll*, su textura corresponde a Franco arcilloso caracterizado por ser fino con capacidad de retener humedad (Soil Survey Staff, 1975 citado por Montenegro y Malagón, 1990)

La densidad aparente oscilo entre 1.22 y 1,3 $g.cm^{-3}$, el Diámetro Medio Ponderado por el método de estabilidad en húmedo fue de 0,40 mm correspondiente a un suelo inestable de acuerdo a la clasificación dada por Montenegro y Malagón (1990), la conductividad hidráulica saturada es alta según la clasificación dada por Pizarro (1979), con un valor de 8,5. $cm.h^{-1}$. La función hidráulica del suelo (curva de característica de retención de humedad) fue determinada siguiendo la metodología de platos de Richard (Klute,1986) se presenta en la figura 5. Los parámetros fueron obtenidos mediante la técnica inversa a través del software RETC (V60).

Tabla 6. Propiedades físicas del suelo estudiado

	.%.	$Cm^3.hora^{-1}$	$.g.cm^{-3}$	mm	%
Textura F Ar					
Arcilla	31,76				
Limo	28				
Arena	40,2				
Conduc. hidráulica		8,5			
Densidad aparente			1,23		
DPM				0,4	
Porosidad total					52,5

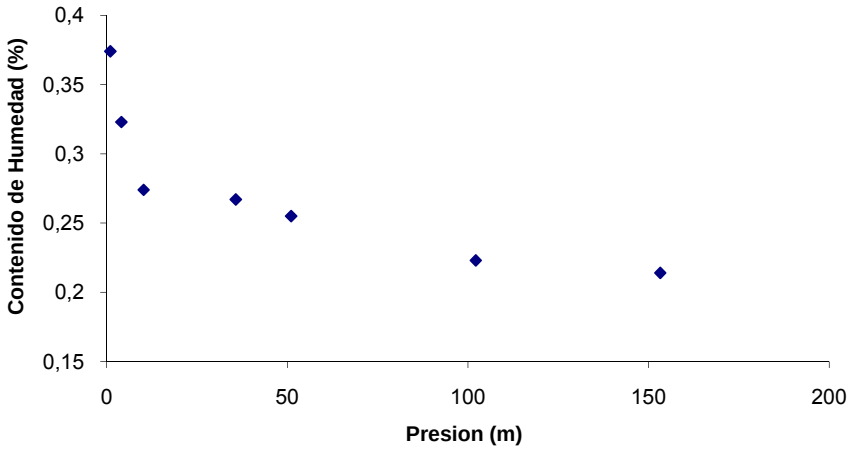


Figura 5. Curva de retención de humedad determinada en el suelo estudiado.

Ecuación de de Van Genuchen, (1991) para el suelo de Manuelita

Figura 5.

$$\theta(h) = 0{,}053 + \frac{0{,}47249}{\left[1 + (18{,}641h)^{1{,}131}\right]^{0{,}1158}}$$

R2= 0,969

5.1.3 Análisis mineralógico

Se encontró una constitución mineralógica dominante de este suelo por parte de la caolinita y la gibsita, los cuales tienen una disposición laminar de tipo 1:1, que exhiben una baja CIC que oscila entre 5 a 10 meq/100g; según Besoain (1985) estos minerales presentan una estructura rígida, haciéndolas bastante estables en el suelo; su principal característica radica en que la sustitución isomórfica que presentan es muy baja al igual que la actividad físico-química (Tabla 8).

Tabla 7. Resultados análisis mineralógicos por difracción de rayos X.

Constitución	
Integrados 2:1 – 2:2	Tr
Micas (probablemente moscovita)	+(12%)
Caolinita	++++(54%)
Gibsita	++(26%)
Feldespatos	+(6%)

Convenciones: ++++ dominante (>50%) +++ abundante(30-50%) ++ común(15-30%) + presente(5-10%) tr= trazas(<5%). Fuente: Análisis realizados por laboratorio de suelos del IGAC

5.2 Caracterización química de la vinaza

La caracterización química de la vinaza al 23º Brix utilizada para esta investigación se presenta en la tabla 9. Como se observa esta vinaza presenta fuerte acidez, pH 4.5 y alta CE (20,05 dS/m); sobresalen altos contenidos de elementos menores (Fe 149ppm, B 2,48ppm, Cu 38,29, Mn 32,40ppm y Zn 19,93ppm); el contenido de M.O es alto (11,35%) al igual que el de K (1,20%).

Los contenidos de nutrientes que presentó la vinaza dependen en gran medida del ingenio productor y de su concentración. Su potencialidad como fertilizante estuvo asociada al tipo de suelo donde se aplico y sus efectos son consecuencia de la interacción entre las propiedades físicas, químicas y biológicas (Narváez, 2008).

Tabla 8. Caracterización química de la vinaza empleada

Brix	pH	CE dS/m	Determinación %								Micronutrimentos ppm				
			M.O	N - Total	P2O5	CaO	MgO	K2O	Na2O	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn
23,72	4,5	20,05	11,35	0,35	0,21	0,64	0,44	1,20	0,12	0,42	2,48	38,29	149,22	32,40	19,93

Fuente: Laboratorio químico de Campo Ingenio Providencia S.A

5.3 Laminas delgadas de suelo

Entre los componentes minerales gruesos se encontró feldespato, cuarzo, anfíboles y muscovita en cantidad aproximada del 70%; los fragmentos de roca encontrados son de naturaleza metamórfica (Cuarcita, gneis y esquistos); en cuanto a minerales finos se observó arcilla con hierro; su agregación es en bloques subangulares; y en cuanto a edaforrasgos se encontraron algunos revestimientos de carbonato de calcio, tanto en las muestras tomadas antes de iniciar el experimento como en las que fueron tomadas 6mdda, (Anexo 18 y 19), estos revestimientos no son causados por la aplicación de la vinaza.

En las secciones delgadas de suelo realizadas 2, y 6 mdda se observaron revestimientos de M.O o en este caso de vinaza, lo cual confirmaría que posiblemente pasados 2 meses de la aplicación, en los primeros 5cm de profundidad la vinaza ha sido degradada o se ha perdido por lavado.

5.4 Estabilidad estructural determinada en húmedo

Se realizo análisis de varianza (Anexo 20) y se observo que no existieron diferencias significativas entre los tratamientos aplicados, pero estas si se presentaron entre épocas de muestreo. En general las pruebas de promedios realizadas para los muestreos mostraron que los valores de DPM encontrados 4 y 2 meses después de la aplicación (mdda) fueron iguales entre si y mayores que

en el muestreo realizado 6mdda (Anexo 21). El mayor valor de DPM se presentó en las muestras de suelo tomadas 4mdda y fue un 37% más alto que en las muestras tomadas 6mdda.

Se realizo una regresión múltiple en la cual se tomo como variable dependiente el DPM y como independientes los contenidos de Ca, Mg y Fe. El R cuadrado encontrado fue muy bajo, por lo anterior se infiere que el contenido de estos elementos en el suelo no explica el comportamiento del DPM.

Como se observa en la figura 6 todos los tratamientos mostraron la misma tendencia lineal decreciente del DPM a través del tiempo y con el incremento de la dosis de vinaza. Este resultado posiblemente se puede deber a que después de la toma de las muestras hubo un reacomodamiento natural de las partículas de suelo, además la aplicación del agua semanalmente y la vinaza cargada de electrolitos (K^+, Na^+ y probablemente ácidos fúlvicos) pudieron generar desestabilización de los agregados.

Los valores de DPM encontrados estuvieron por debajo de 0,5mm, y según la clasificación dada por la Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo (1990, 2001), este suelo es considerado como inestable.

Investigaciones realizadas por Narváez (2008) y Montenegro (2008) en este mismo suelo, tratado con combinaciones de vinaza y KCl, mostraron ligeras disminuciones en el índice de estabilidad obtenido entre muestreos.

Otros estudios realizados en España revelaron que el estado de agregación del suelo se redujo por los altos contenidos de sodio y ácidos fúlvicos presentes en la vinaza de remolacha azucarera, se observaron efectos positivos en la agregación del suelo cuando la vinaza fue compostada. (Tejada y González 2006; Tejada *et al.,* 2006; y Tejada *et al.,* 2007).

En general se comprobó que la aplicación de vinaza, tuvo un posible efecto en el corto plazo sobre la estabilidad estructural del suelo, mostrando que pasados 2 meses de la aplicación de la vinaza hubo un descenso en esta propiedad, posiblemente después de este periodo desaparecieron los enlaces temporales y transitorios generados por la población microbial.

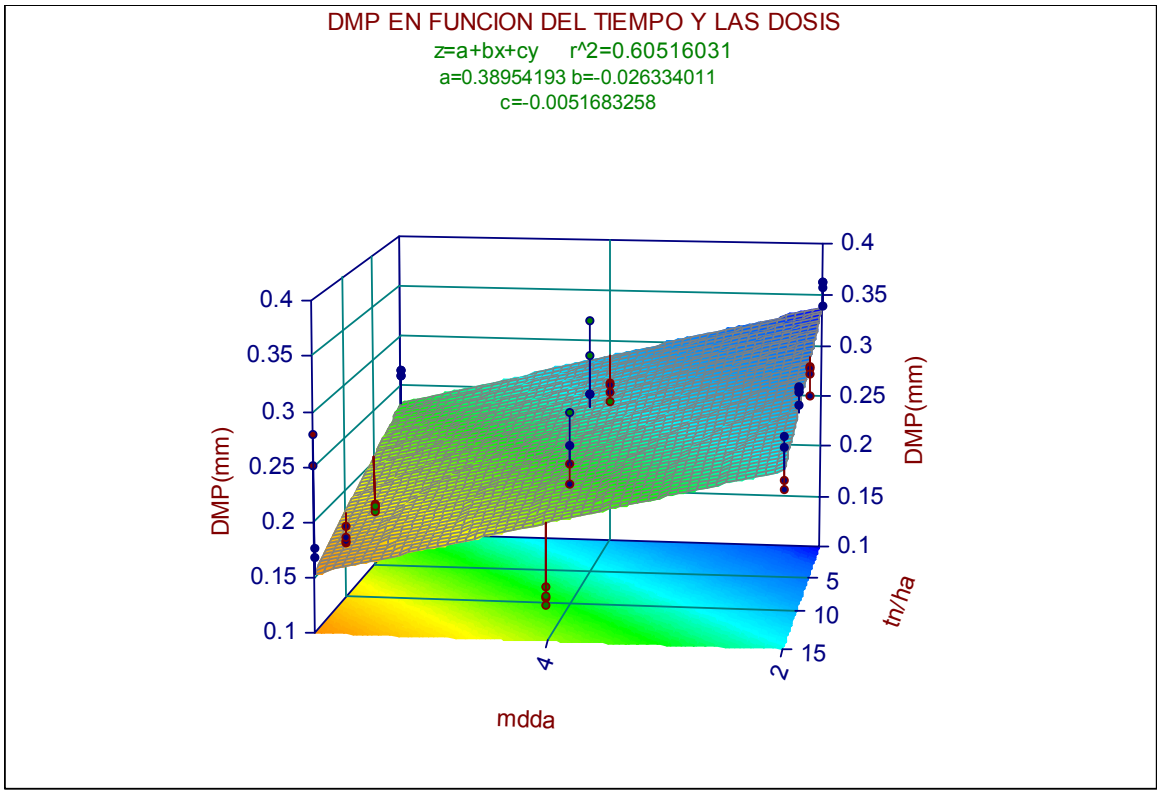


Figura 6. Determinación de la estabilidad estructural en húmedo. DPM en función del tiempo y las dosis de vinaza

En este estudio no se realizo análisis microbial, pero en la investigación realizada por Montenegro en el 2008, para este mismo suelo, se determinó una alta actividad microbiana alrededor de los 28 días después de la aplicación de la vinaza, observándose un descenso luego de este periodo, ocasionado probablemente por una estabilización de las poblaciones después de un ciclo intenso por efecto de la aplicación de fertilizantes.

Tisdall y Oades (1982), en su modelo de jerarquía de agregados, propusieron que los macroagregados (>250µ) son formados por enlaces estables entre microagregados (20 – 250 µ), por enlaces temporales (hifas de hongos y raíces) y por enlaces transitorios (microbios, plantas y polisacáridos derivados). Por otro lado Elmholt *el al*. (2008) citado por Fuentes *et al.* (2008) observaron efectos similares de hifas de hongos y carbohidratos sobre formación de micro y macroagregados, concluyendo que los niveles de Carbono aportados al suelo controlan la formación de agentes enlazantes que generan agregación.

Los hongos por acción mecánica, participan en la mejora de la estabilidad estructural de los agregados del suelo (Alexander, 1980; Labrador, 1996 citados por Montenegro, 2008). Probablemente este suelo este dominado por hongos que se alimentan de azucares y sustratos de rápida descomposición como la vinaza (Primavesi 1982), y debido a la competencia por tales sustratos; hace que los hongos lleguen a ser abundantes después de la adición de estas fuentes de carbono, aunque su número declina rápidamente después de la proliferación inicial, y agotadas estas sustancias la situación es igual a la del inicio (Burbano 1989).

5.5 Estabilidad estructural determinada en seco

Se realizó análisis de varianza para la distribución de los agregados en seco, teniendo en cuenta los porcentajes de agregados retenidos en cada tamiz empleado (6.3, 4, 2, 1, 0.5, 0.25, 0,125, <0,125 mm); no se encontraron diferencias significativas entre tratamientos; entre muestreos se encontraron diferencias significativas para algunos diámetros de tamiz excepto para los diámetros 1 y 0.5mm (Anexo 22).

Según la clasificación dada por Volveras y Amézquita (2009), para la estabilidad estructural determinada en seco, se puede afirmar que el suelo estudiado es estable, porque al cuantificar los porcentajes de agregados retenidos en los tamices con diámetro mayor a 2mm, más de la mitad de sus agregados

estuvieron en este rango (Tabla 10); sin embargo de acuerdo a la clasificación de la estabilidad estructural en seco dada por Montenegro y Malagón (1990) (Anexo 23) según a la cantidad de agregados con diámetro menor de 0,5mm, este suelo posee una estabilidad estructural media debido a que los agregados menores de 0.5mm estuvieron entre el 20 y 40% del total de agregados.

Boersma y Kooistra, (1994) y Amézquita, (1994) afirman que una proporción alta de microagregados (agregados con diámetro menor a 2mm) se puede considerar como indicador de degradación estructural del suelo, lo cual deduce una relación entre dispersión del suelo, infiltración, erosión y las modificaciones en la estructura por efecto del tipo de uso del suelo.

Tabla 9. Cambios en la distribución de agregados (%) secos al aire por efecto del paso del tiempo

Distribución (%) de agregados por tamaño (mm)								
Muestreo (mdda)	> 6,3	6,3- 4	4-2	2-1	1-0,5	0,5-0,25	0,25-0,125	<0,125
2	21,05 b	16,52 a	20,55 a	11,10 a	8,9 a	8,19 b	6,42b	9,23 a
4	22,136 b	17,75 a	17,32 b	10,7 a	9,09 a	6,61 ab	7,21 b	9,074 a
6	28,019a	13,39 b	14,76 c	10,46 a	10,28 a	8,52 a	8,79 a	5,76 b

Valores con la misma letra no difieren significativamente Duncan P (0,05)

Se realizó análisis de varianza para la variable DPM, no se presentaron diferencias significativas entre tratamientos pero si entre épocas de muestreo, y la prueba de promedios mostró que el mayor valor de DPM se presentó en el muestreo realizado 2mdda (Anexos 24 y 25) con un valor de 3,47mm y este fue diferente estadísticamente de los valores encontrados en las otras épocas de muestreo. En la figura 7 se observa claramente como al igual que con las pruebas de estabilidad en húmedo, las muestras de estabilidad en seco, mostraron una tendencia lineal decreciente del DPM con el tiempo más no con las dosis de vinaza.

La composición mineralógica del suelo posiblemente influyo en la baja respuesta a la aplicación de los tratamientos, puesto que las arcillas de tipo 1:1 que dominan la fracción mineral son bastante estables en el suelo y dada su baja CIC la adición de compuestos orgánicos como las vinazas no alteran la fase intercambiable, perdiéndose rápidamente por lixiviación y por lo tanto no causo el efecto agregante que se esperaba.

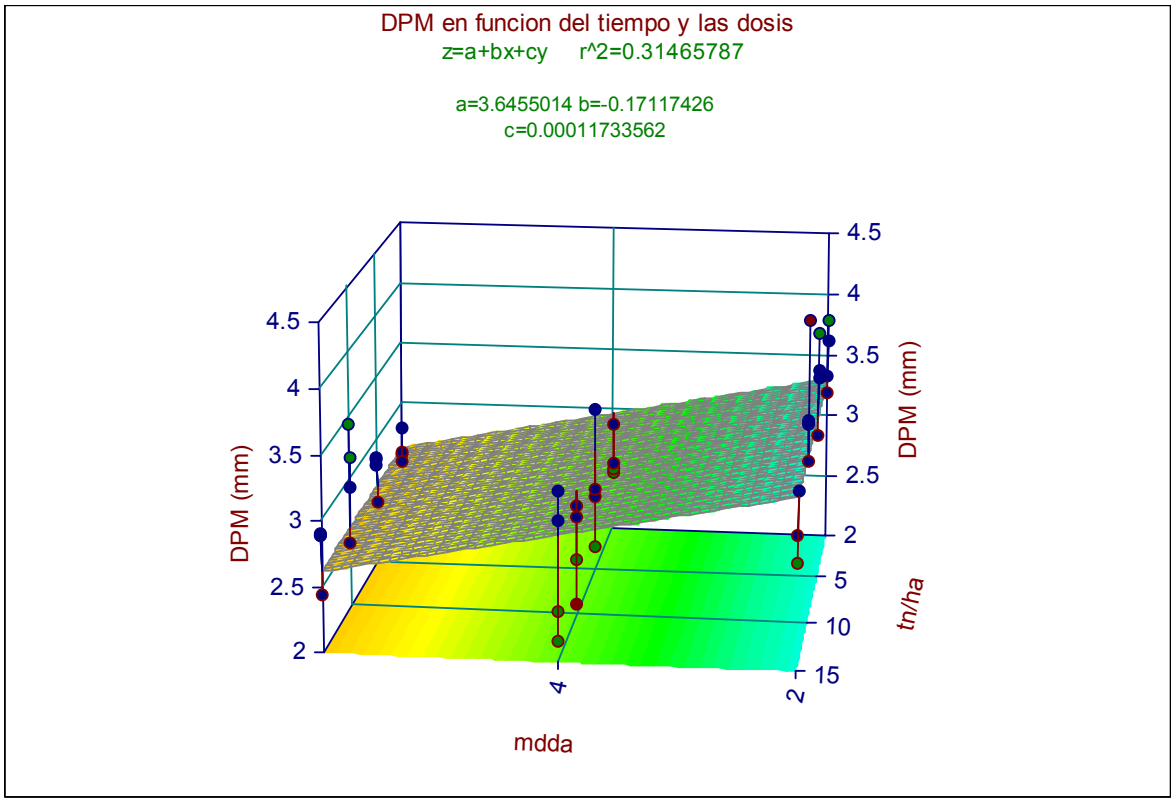


Figura 7. Determinación de estabilidad estructural en seco. DPM en función del tiempo y las dosis de vinaza

.

5.6 Resistencia de los agregados a una fuerza de impacto

Se realizó análisis de varianza para medir la resistencia de los agregados a una fuerza de impacto, no se encontraron diferencias significativas para las variables dosis de vinazas y repeticiones; se encontraron diferencias altamente significativas para los niveles de energía aplicados y épocas de muestreo (Anexo 26).

La prueba de promedios para los niveles de energía aplicados (variación entre 2 y 12 Joules) mostró una relación inversa del DPM con el incremento de la energía encontrándose una función de respuesta (Figura 8) (Anexo 27).

Para las épocas de muestreo la prueba de promedios (Anexo 28) mostró que el valor de DPM 2mdda fue un 25 % y 32% mayor que el encontrado 4 y 6 meses después de la misma respectivamente. La figura 9 ilustra claramente la tendencia generalizada que se presento al disminuir el DPM con el tiempo más no con las dosis, al igual que sucedió en las pruebas de estabilidad en seco.

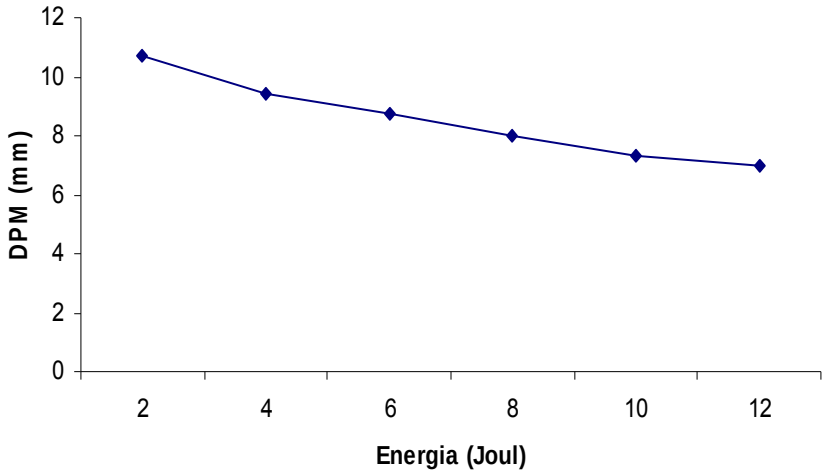


Figura 8. DPM promedio por cada nivel de energía aplicado.

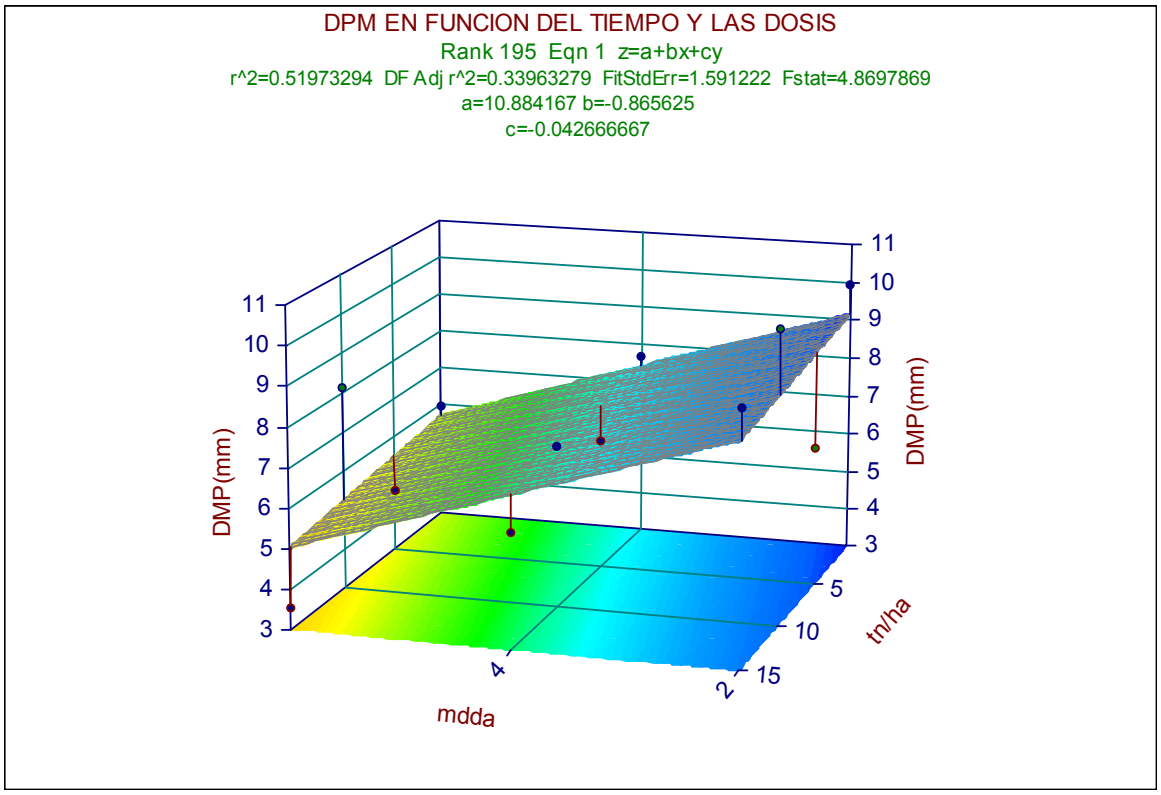


Figura 9. Determinación de estabilidad estructural sometiendo los agregados a una fuerza de impacto. DPM en función del tiempo y las dosis de vinaza

El estado de humedad de las muestras de suelo empleadas en estas determinaciones era la higroscópica, no se emplearon muestras en estado friable puesto que este fue un método experimental en donde se pretendía simplemente establecer una comparación entre tratamientos. Según Zapata y Gaytan, en la práctica para lograr los mejores resultados tecnológicos con la menor aplicación de energía en labores de preparación del terreno, los suelos deben trabajarse en un rango de humedad entre los límites de contracción (LC) y límites inferiores de plasticidad (LIP), conocido como estado friable del suelo. Los puntos de aplicación mínima de energía en un suelo Franco se encontraron cuando el potencial mátrico estuvo entre -0.062 MPa (pF 2.8) y -0.246 MPa (pF 3.4) para la aradura y -0.123 MPa para el rastreo.

5.7 Resistencia de los agregados a la compresión

Se realizó análisis de varianza para medir la resistencia de los agregados a la compresión, no se encontraron diferencias significativas entre tratamientos y entre épocas de muestreo se encontraron diferencias con probabilidad del 17% (Anexo 29); la prueba de promedios señaló que los muestreos realizados 4 y 2mdda fueron iguales entre si y diferentes del realizado 6mdda. El valor promedio más alto de Energía aplicada fue 36,72 J/m^2 correspondiente al muestreo realizado 4mdda siendo un 37,8% más que el realizado 6mdda (Anexo 30).

Aunque no se observaron diferencias significativas ($P< 0,05$) entre tratamientos y entre muestreos, en la figura 11 se observa una leve tendencia lineal decreciente de la energía con el tiempo y las dosis de vinaza.

Aunque el método alternativo empleado para determinar la estabilidad estructural del suelo por medio de la medición de la resistencia a la compresión de los agregados, no arrojo diferencias significativas al nivel de probabilidad del 5%, los valores encontrados pueden ser usados para estimar la energía que deben impartir los implementos de labranza sobre un suelo seco para producir un cambio especifico en la distribución de tamaños de agregados, además podrían servir para medir la fuerza de rompimiento, durabilidad de los agregados después de múltiples operaciones de labranza, resistencia de los agregados y susceptibilidad a la erosión eólica (Skidmore & Powers, 1982).

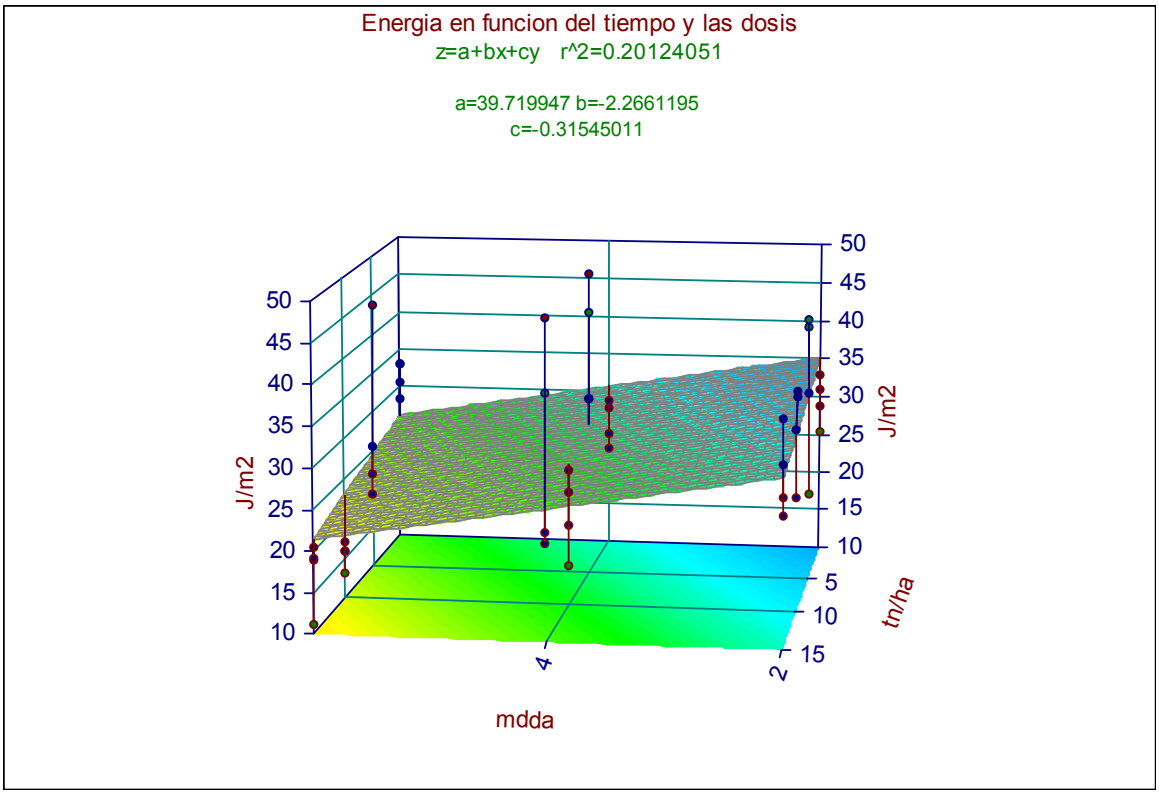


Figura 10. Determinación de la estabilidad estructural por el método de resistencia a la compresión. DPM en función del tiempo y las dosis de vinaza

6. CONCLUSIONES

- DPM obtenido como índice de estabilidad estructural determinado con la prueba de estabilidad de agregados en húmedo (Yoder), no mostró cambios debidos a la aplicación de diferentes dosis de vinazas, pero si los presento a través del tiempo, siendo mayor la estabilidad estructural dos meses después de la aplicación.

- La distribución de agregados en seco no mostró cambios debidos a la aplicación de las dosis de vinaza, sin embargo el DPM fue mayor en el primer muestreo y presento una disminución con el tiempo.

- La resistencia a la ruptura de los agregados del suelo empleada como medida indirecta de la estabilidad estructural, disminuyo con el paso del tiempo y no mostró cambios debidos a la aplicación de las dosis de vinaza.

BIBLIOGRAFIA

AGROSAGI, 2007. Tablas de fertilidad para la interpretación de análisis de suelos sp.

AMEZQUITA, E. 1994. Las propiedades físicas y el manejo productivo de los suelos. EN: Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. Fertilidad de suelos, diagnostico y control., Bogotá, 1994. pp. 137 –152.

ARIAS, M.N. 1984. Evaluación de métodos para la determinación de estabilidad estructural en Vertisoles de Entre Ríos. En: Ciencia del Suelo. Vol 2 – No 1. 1984.

BAVER, L.D., W.H. GARDNER AND W.R. GARDNER, 1972. Física de suelos. Departamento de Agronomía de la Universidad del Estado de Ohio. Cuarta Edición. 4: 127-165.

BENQUE, M.B; MERMUT, A.R, Y SHARIATMADARI, H. 1999. Retention of disolved organic carbon from vinasse by a tropical soil, kaolinite, and Fe-oxides. Geoderma 91 (1999) 47-63.

BESOAIN, E. 1985. Mineralogía de arcillas de suelos. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA). San José, Costa Rica. 1205 p.

BISWAS. A.K., MOHANTY. M., HATI. K.M., MISRA. A.K. 2009. Distillery effluents effect on soil organic carbon and aggregate stability of a *Vertisol* in India. En: Soil & Tillage Research. journal homepage: www.elsevier.com/locate/st i l l.

BLACK, C.A. 1975.Relaciones suelo-planta. México, CRAT. v.1.

BOERSMA, O. H., KOOISTRA, M.J. 1994. Differences in soil structure of silt loam Typic Fluvaquents undervarious agricultural management practices. Agric Ecosyst Envirom (1994) 51: 21-42.

BOHN, H.L., Mc NEAL, B.L., O CONNOR, G.A. 1993. Química del suelo. Editorial Limusa, S.A. Balderas, México, D.F. Primera edición. p 324-326.

BRICEÑO, O.C. 2006. Aspectos estructurales y de entorno para proyectos e inversiones en bioetanol. En: Carta trimestral. Cenicaña. Año 28, Cali, Colombia. 2006, 2: 18.

BRONICK, C.J., LAL R. 2005. Soil structure and management: a review. En: Geoderma 124 (2005) 3 –22.

BURBANO, O.,H. 1989. El suelo: una visión sobre sus componentes bioorgánicos. Pasto: Universidad de Nariño. 1989. 447 p.

BURBANO, O., H. 1990. Interacciones de la Materia Orgánica y los Elementos Menores. En: Seminario: Actualidad y Futuro de los Micronutrimentos en la Agricultura. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo, Palmira. Colombia.

CADENA, Z.M., CAMPOS, M.,S. Determination of the Status of Moisture Content for a Minimum Energy Application for Tillage with Mechanical Traction. En: Terra Latinoamericana, Vol. 21, Núm. 1, enero-marzo, 2003, pp. 13-19

CASTRO, H. 1998. Fundamentos para el conocimiento y manejo de suelos agrícolas manual técnico. Instituto universitario Juan de Castellanos Tunja pp 179.

CERDA, A. 2000. Aggregate stability against water forces under different climates on agriculture land and scrubland in southern Bolivia. Soil Till. Res., 57: 159 -166.

CIAT, 2007 Tecnologías modernas para alimentación animal: uso de efluentes agroindustriales de plantas de procesamiento de caña de azúcar y yuca en suplementos nutricionales CIAT –CLAYUCA -Palmira, Marzo 21 Presentación en power point.

DA SILVA, F.E Y OLIVEIRA, M.A. 1987. Efeitos da aplicação da vinhaça nas propriedades químicas, físicas e biológicas do solo. En: Boletim Técnico. Copesurcar 36 3-7.

DORRONSORO, C. 2002. Curso on – line: Micromorfografía de suelos. Disponible en: http:/ edafologia.ugr.es Fecha de descarga: Oct 2/2009.

FUENTES, J.A., ARRUE, J.L., MARTINEZ, C.C., LOPEZ, M.V. 2008. Aggregate breakdown during tillage in a Mediterranean loamy soil. En: Soil and tillage Research. Vol 101. Issues 1-2. Sep- Oct. 2008. pp 62-68.

GARCÍA O.A Y. ROJAS C.C. 2006. Posibilidades de Uso de la Vinaza en la Agricultura de Acuerdo con su Modo de Acción en los Suelos. SCCS Y SUCROMILES. Nota técnica.

GEMTOS. T. A., CHOULIARAS. N., MARAKIS. St. 1999. Vinasse rate, time of application and compaction elect on soil properties and durum wheat crop. En: J.Agric.Engng 73,283-296.

GOMEZ. F.E. 1999. Procesos erosivos, estrategias para su caracterización e implementación de sus prácticas básicas de control y prevención. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. p 49.

GOYES, A. Y BOLAÑOS, G. 2005. Un estudio preliminar sobre el tratamiento de vinazas en agua supercrítica. Grupo de investigación en Termodinámica Aplicada y Fluidos Supercríticos. Escuela de Ingeniería Química, Universidad del Valle, Cali. En: XXIII congreso Colombiano de Ingeniería Química. Manizales, Agosto 24 a 26 de 2005.

IGAC, CVC 2004. Levantamiento de suelos y zonificación de tierras del Departamento de valle del Cauca 2004. 775 p.

JARAMILLO. D.F. 2002. Introducción a la ciencia del suelo. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, Facultad de Ciencias y Geociencias.

JARAMILLO. D.F. 2004. Repelencia al agua en suelos, con enfasis en Andisoles de Antioquia. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, Facultad de Ciencias y Geociencias.

KAY, B.D. AND E. PERFECT. 1994. Structural Aspects of Soil Resilience. Department of Land Resourse Science, University of Guelph. Guelph, Ontario, Canada N1G 2W1. In: Soil Resilience and Sustainable Land Use. Chapter 25. p 249-467.

KORNDÖRFER, G.H; ANDERSON, D. 1997. Use and impact of sugar-alcohol residues vinasse and filter cake on sugarcane production in Brazil. Sugar y Azucar. Englewood Cliffs, NJ. n.92, v.3, pp.26-35.

KORNDÖRFER, G.; NOLLA, A.; LARA, W. WALDO A. R.2004. Impacto ambiental del uso de la vinaza en la agricultura y su influencia en las características químicas y físicas del suelo Memorias seminario “vinazas, potasio y elementos menores para una agricultura sostenible” Sociedad Colombiana de la Ciencia del suelo, Palmira. Sp.

LAL, R. No till farming. Soil an water conservation and management en the humid and subhumics tropics. Ibadan, Nigeria : Institute of tropical agriculture. monograph No 2 (1981); p 1 – 64.

LAL, R. AND M.K. SHUKLA. 2004. Principles of soil physics. The Ohio State University Columbus, Ohio, U.S.A. 2: 93-148.

MADEJÓN. E., LÓPEZ,R. MURILLO. J.M., CABRERA. F. 2000. Agricultural use of three (sugar-beet) vinasse compost: effect on crops and chemical properties of a Cambisol soil in the Guadalquivir river valley (SW Spain). En: Agriculture, Ecosystems and environment (2001) 84, 55-65

MALAGON, D. Y MONTENEGRO, H. 1990. Propiedades físicas de los suelos. Instituto geográfico Agustín Codazzi. Bogota. P. 88.

MONTENEGRO., G. S. 2008. Influencia de la aplicación de vinaza sobre la presencia, actividad y biomasa microbiana del suelo en el cultivo de maíz dulce (zea mays). Universidad Nacional de Colombia, Sede Palmira.

MORALES, A., GODSHALL, M.A., LARRAHONDO, J.E. 2004. Identificación de compuestos orgánicos en vinaza. 5-10.

MOTTA et al, B. 1990. Métodos Analíticos del Laboratorio de Suelos IGAC, Bogotá pp 4-6.

NARRO FARÍA, E. 1994. Física de suelos, con enfoque agrícola. Editorial Trillas. México. 194 p.

NARVAEZ, C. M. 2008. Evaluación de actividad de Fosfatasas y Deshidrogenasas por efecto de la aplicación de vinazas en suelos cultivados con maíz dulce (Zea Mays L), Universidad Nacional de Colombia, Sede Palmira

PIZARRO, F. 1978. Drenaje agrícola y recuperación de suelos salinos. Editora agrícola Española, S.A. Madrid.

PRIMAVESI, A.O. 1982. Manejo ecológico do solo:Agricultura em regioes tropicais. São Paolo; Nobel,. 541 p.

QUINTERO, R. 2004. Perspectivas acerca del uso y manejo de vinazas aplicadas al suelo Memorias seminario “vinazas, potasio y elementos menores para una agricultura sostenible” Sociedad Colombiana de la Ciencia del suelo, Palmira.

QUINTERO, R. 2006. Respuestas de la Caña de Azúcar a las vinazas aplicadas al suelo. En: VII Congreso de Tecnicaña, Cali, Colombia, 6-8 de Septiembre. V.1 p. 12-20.

ROJAS, D.L., ROJAS, P.H., MENJIVAR, F.J.C., 2008. Estimacion de la conductividad hidraulica saturada en un suelo tratado con vinaza. Acta Agronomica, Volumen 57, Numero 2. Abril- Junio de 2008. Pag 125 – 128.

SCCS, 2001. Fertilidad de suelos diagnostico y control. Publicación de la Sociedad Colombiana de la Ciencia del suelo. 2 Ed. Bogotá p 524

SCCS, 1990. Fundamentos para la interpretación de análisis de suelos, plantas y aguas para riego. Publicación de la Sociedad Colombiana de la Ciencia del suelo. 3 Ed. Bogotá p 323.

SCHWERTMANN, U., AND TAYLOR, R. M. 1989. Iron oxides. In Minerals in Soil Environments, 2nd ed. (J. B. Dixon, and S. B. Weed, Eds.), pp. 379—438.

SKIDMORE, E., and POWERS. 1982. Dry soil-aggregate stability; energy based index. Soil Sci. Soc. Am. J. 46:1274-1279.

STOOPS, G.J. Guidelines for soil thin section description. Universiteit Belgium. 1998. 120 p.

TEJADA, M. Y GONZALEZ, J. L. 2004. Effect of the application of compost originating from crushed cotton gin residues on wheat yield under dryland conditions. Eur. J. Agron. 19:357 – 368.

TEJADA, M., GONZÁLEZ, J.L. 2005. Beet vinasse applied to wheat under dryland conditions affects soil properties and yield. En: European journal agronomy. 23 (2005) 336–347.

TEJADA, M., MORENO, J.L., HERNÁNDEZ, M.T. Y GARCÍA, C. 2007. Application of two beet vinasse forms in soil restoration: Effects on soil properties

in an arid environment in southern Spain. En: Agriculture, ecosystems and environment. 119 (2007) 289-298.

TEJADA. M., GONZALEZ .J.L. 2006. Effects of two beet vinasse forms on soil physical properties and soil loss. En: Catena(2006) 68, 41-50

TERUM. L. S., ASSIS. L., DE OLIVERA. J. 2006. Mineralización de la paja de caña de azúcar en suelo adicionado con vinaza (Subproducto del alcohol de caña de azúcar) y fertilizante nitrogenado. En: Agricultura Técnica, Chile (2006) 66(1), 90-97

TISDALL, J. M. AND OADES, J. M. 1982. Organic matter and water-stable aggregates in soils. En: Journal of Soil Science. Vol. 33; p. 141-163.

VAN GENUCHEN, M.Th., LEIJ, F.J., and YALES, S.R. 1991. The RETC code for quuantifyin the hydraulic functions of unsaturaded soils, Version 1.0. EPA Report 600/2-91/065, U.S. Salinity laboratory, USDA, ARS, Riverside, Caliofornia.

VOLVERAS, M.B., AMEZQUITA, C.E. 2009. Estabilidad Estructural del suelo bajo diferentes sistemas y tiempo de uso en laderas Andinas de Nariño, Colombia. En Acta Agronómica, Vol 58, No 1 (2009).

ANEXOS

Anexo 1 Metodologías de laboratorio que empleadas en la determinación de las Variables respuesta.

Distribución de agregados en seco

La metodología propuesta por Kemper y Chepil (1965) citados por Jaramillo (2004) consiste en hacer un análisis de distribución de tamaños de agregados haciéndole un tamizado que permita separar los agregados que componen el suelo en varios grupos por tamaño y establecer el porcentaje que corresponde a cada grupo. Este procedimiento es especialmente útil cuando se quieren comparar y evaluar diferentes prácticas de manejo en su efecto sobre el suelo o cuando se desea conocer el grado de deterioro físico del suelo que han producido dichas prácticas al ser utilizadas durante períodos de tiempo relativamente largos. Este análisis es adecuado para estimar la susceptibilidad del suelo a la erosión eólica. El procedimiento es el siguiente:

- Se toma una muestra de aproximadamente 200 g de suelo en el campo, húmeda, pero no mojada.
- Se seca la muestra a temperatura ambiente durante 3 ó 4 días; puede requerirse más tiempo si se tomó muy húmeda o si el suelo es rico en materia orgánica y/o en arcilla.
- Se toman unos 120 g de suelo seco al aire y se criban a través de un tamiz de 10mm o más de tamaño de abertura. El tamaño del tamiz se selecciona teniendo en cuenta el tamaño de los agregados mayores del suelo (no los tamaños excepcionales).
- Se recoge el material que pasa a través del tamiz seleccionado y se cierne a través de un conjunto de tamices con aberturas de 5 - 2 - 1 - 0.5 - 0.25 y 0.1mm de diámetro equivalente, haciendo movimientos helicoidales con ellos (no necesariamente todos a la vez) durante 5 minutos con cada tamiz; tener la precaución de ajustar bien, tanto los tamices, como la tapa y el fondo, para evitar pérdidas de material.

- Se recupera el material retenido en cada tamiz, se seca al horno durante 24 a 36 horas a 105ºC, se pesa seco al horno y se calcula el porcentaje de agregados en cada tamiz con respecto al peso total de la muestra utilizada.
- Los resultados se pueden consignar en un formulario.
- Análisis de los resultados. Una manera interesante de hacerlo consiste en elaborar una gráfica de adición porcentual de tamaño medio de agregados vs porcentaje acumulado de agregados de un determinado tamaño promedio, la cual permite observar que tan homogénea es la distribución de los agregados del suelo.
- Se establecen algunos índices de estabilidad, con los datos de la determinación anterior, como los que se verán más adelante, los cuales pueden ser muy útiles para hacer comparaciones.

Método de estabilidad en húmedo (Yoder)

Consiste en someter una muestra de suelo, sin disturbar, a agitación en agua por un determinado tiempo; la muestra se coloca en un juego de tamices de diferentes diámetros de perforación y, al final del proceso, se establece el porcentaje de agregados de los diferentes tamaños que quedan sin destruir; los tamaños de los agregados que se tomen para hacer las interpretaciones varían según las aplicaciones que se vayan a hacer. Esta determinación se desarrolla de la siguiente manera:

- Se toma una muestra de suelo sin disturbar de unos 120 g, se criba en un tamiz con abertura de 10 mm y la parte de la muestra que pasa a través del tamiz se recoge; se toma una submuestra del material que pasa a través del tamiz y se le determina el contenido de humedad gravimétrica que posee [W (%)].

- Con esta información se hace la corrección de humedad para establecer el peso seco de la muestra tomada para hacer el análisis.
- Se ensambla un juego de tamices de 5 - 2 - 1 - 0.5 - 0.25 y 0.1 mm de tamaño de abertura; se pesa todo el material que pasó por el tamiz de 10 mm y que está disponible para el análisis y se coloca sobre el primer tamiz del tándem, humedeciéndolo con un atomizador y luego dejándolo que se sature lentamente, por capilaridad, durante unos 15 minutos, para evitar la explosión de agregados por presión de aire atrapado en los poros.
- Se coloca el juego de tamices con la muestra saturada en el equipo de Yoder, sumergiéndolos dentro del agua en el recipiente cilíndrico, hasta que los hilos del tamiz superior queden a ras con el nivel del agua, cuando el aparato se encuentre en su punto más alto de funcionamiento.
- Se pone a funcionar el equipo por 30 minutos, a un ritmo de 2 ciclos por segundo, al cabo de los cuales se retiran los tamices, se dejan escurrir por 5 minutos, se traslada su contenido a recipientes adecuados y se ponen a secar en horno a 105°C, durante 24 a 36 horas, para luego pesar los agregados secos que quedaron retenidos en cada uno de los tamices.
- Se calcula la cantidad de agregados que quedaron en cada tamiz en porcentaje, con respecto a la cantidad inicial de muestra utilizada, con la relación [3.1].
- Con la información recogida se pueden calcular varios índices que sirven para caracterizar la estabilidad de la estructura del suelo analizado, como el diámetro ponderado medio (**DPM**), el diámetro geométrico medio (**DGM**), el índice de estructura (**IE**), la suma de agregados extremos (**AE**) y/o el contenido de agregados finos, es decir, menores a 0.5 mm de diámetro (**AF**), para los cuales se presentan las respectivas fórmulas a continuación.
- Otra forma de presentar los resultados de los análisis de estabilidad estructural del suelo consiste en realizar una curva de adición porcentual entre el diámetro promedio del rango correspondiente vs el contenido de agregados acumulado, en porcentaje, en ese tamaño. En esta gráfica se puede establecer, por interpolación, el diámetro que le corresponde al 50

% de los agregados acumulados en la prueba, valor que se conoce como diámetro medio estimado (**DME**).

- Se registran los resultados obtenidos en esta determinación.

$$\%\ Retenido\ en\ el\ tamiz = \frac{Peso\ suelo\ retenido\ en\ el\ tamiz}{Pss}$$

$$DPM = \sum_{i=1}^{n} \overline{x_i} \frac{w_i}{100}$$

Compresión no confinada del suelo

Se empleó la técnica de transferencia cuantitativa de energía para determinar la estabilidad estructural de los agregados, para ello, se utilizó un equipo INSTRON modelo 5569 (Figura a), el cual consta de dos platos metálicos entre los cuales se dispone un agregado de suelo con un diámetro promedio de 5,15 mm, la prensa tuvo una taza de desplazamiento de 1mm/s hasta que entraba en contacto con el agregado que era comprimido lentamente, mientras esto sucedía, el equipo, que estaba conectado a un computador con un software especial, iba realizando un grafico de Carga (N) vs distancia mm (Figura b).

Para determinar la estabilidad estructural del suelos se empleó la metodología propuesta por Skidmore y Powers (1982) la cual consiste en integrar el área bajo la curva comprendida entre el primer pico en el cual el agregado se rompe y aproximadamente el 50% más de la carga inicial de rompimiento. Los resultados fueron expresados, como energía por unidad de área superficial, en joules por metro cuadrado (J/m2).

Figura a. Equipo empleado para determinar curva de ruptura.

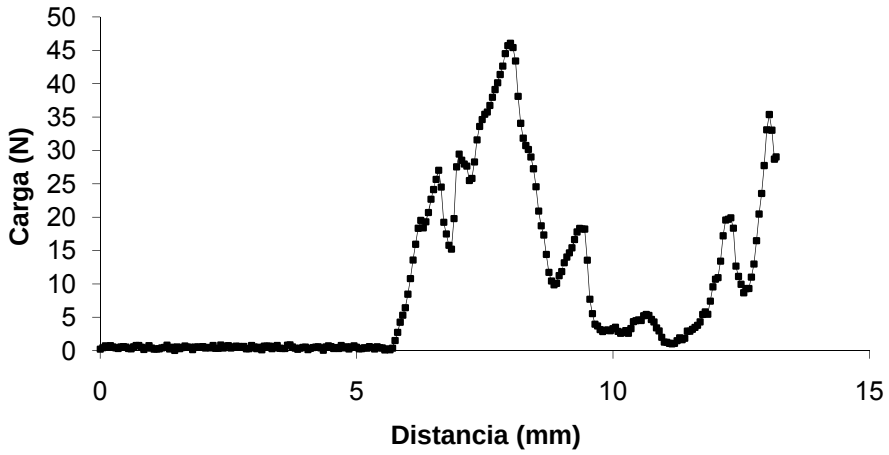


Figura b. Ejemplo de grafico obtenido luego de someter un agregado a compresión

Resistencia de los agregados a una fuerza de impacto

Se empleó una metodología experimental desarrollada en el laboratorio de mecanización agrícola de la Universidad Nacional de Colombia sede Palmira, por el profesor Oscar Chaparro y la estudiante de Ingeniería Agronómica: Natalia Ramos.

Los materiales usados para esta determinación fueron juego de tamices numero 3/8, 4,8,16,20 y 40, máquina de caída libre, lámina de acero, espátula, balanza, brocha, mazo de madera, bolsas plásticas y tazas.

Una variacicón en el diseño experimental fue introducida por la variable energía, adicional en este experimento. Los datos se analizaron como un diseño completamente al azar con un arreglo factorial. Para comparación de promedios se empleo la prueba de Duncan con un nivel de significancia del 5%. También se analizó la tendencia a través de técnicas de regresión y correlación.

Se tomaron 200g de suelo, representativos de cada una de las muestras indisturbadas y fueron secados al aire por un periodo de 36 horas. Posteriormente fueron colocados en la máquina de caída libre (figura 5), la cual estaba calibrada para que la dejara caer la muestra de suelo sobre una lamina de acero desde una altura de un metro. Se recogió la totalidad de la muestra ya disgregada y se pasó por el juego de tamices. El suelo que fue retenido en cada uno de estos se pesó y su valor se consignó en una base de datos, luego se mezcló nuevamente todo lo obtenido en cada uno de los tamices y fue lanzado de nuevo desde la misma altura, nuevamente se pesó lo que se retiene en cada tamiz y se repitió lo descrito anteriormente hasta que cada muestra fue sometida 6 veces al impacto producido por la caída libre desde un metro de altura.

Con los datos obtenidos se determinó el Diámetro Ponderado Medio (DPM), utilizando la metodología propuesta por (Motta, 1990 citado por Gómez 1999) el cual se empleó como indicador de la estabilidad estructural del suelo.

$$DPM = \sum_{i=1}^{n} \overline{x_i} \frac{w_i}{100}$$

Maquina de caída libre empleada en la medición.

Anexo 2**.** Análisis de varianza para contenido de M.O entre tratamientos

Fuente	GL	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	Valor F	Pr > F
Modelo	3	1.75000000	0.58333333	36.84	<.0001
Error	8	0.12666667	0.01583333		
Total	11	1.87666667			

Valores con la misma letra no difieren significativamente (Prueba de Duncan <0,05).

Anexo 3. Prueba de promedios para el contenido de M.O

Grupo	Media (%)	Tratamiento Kg*ha-1
A	3.6667	15.000
A	3.6000	10.000
B	3.3000	5.000
C	2.7000	0

Valores con la misma letra no difieren significativamente (Prueba de Duncan <0,05).

Anexo 4 Análisis de varianza para contenido de Ca entre tratamientos

.Fuente	GL	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	Valor F	Pr > F
Modelo	3	929.8995000	309.9665000	185.76	<.0001
Error	8	13.3488000	1.6686000		
Total	11	943.2483000			

Anexo 5. Prueba de promedios para el contenido de Ca

Grupo	Media ($cmol*Kg^{-1}$)	Tratamiento Kg*ha-1
A	36.690	15.000
A	36.520	10.000
A	35.010	5.000
B	15.800	0

Valores con la misma letra no difieren significativamente (Prueba de Duncan <0,05).

Anexo 6. Análisis de varianza para contenido de Mg entre tratamientos

Fuente	GL	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	Valor F	Pr > F
Modelo	3	54.66435833	18.22145278	217.20	<.0001
Error	8	0.67113333	0.08389167		
Total	11	55.33549167			

Anexo 7. Prueba de promedios para el contenido de Mg

. Grupo	Media ($cmol*Kg^{-1}$)	Tratamiento Kg*ha-1
A	8.9500	15.000
A	8.7333	10.000
A	8.4533	5.000
B	3.8000	0

Valores con la misma letra no difieren significativamente (Prueba de Duncan <0,05).

Anexo 8. Análisis de varianza para contenido de K entre tratamientos

. Fuente	GL	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	Valor F	Pr > F
Modelo	3	0.16850152	0.05616717	7.88	0.0120
Error	8	0.04991667	0.00713095		
Total	11	0.21841818			

Anexo 9. Prueba de promedios para el contenido de K

. Grupo	Media (cmol*Kg^{-1})	Tratamiento Kg*ha-1
A	0.47000	15.000
AB	0.35667	10.000
BC	0.19000	0
C	0.16500	5.000

Valores con la misma letra no difieren significativamente (Prueba de Duncan <0,05).

Anexo 10. Análisis de varianza para contenido de Fe entre tratamientos

. Fuente	GL	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	Valor F	Pr > F
Modelo	3	942.915833	314.305278	13.76	0.0016
Error	8	182.773333	22.846667		
Total	11	1125.689167			

Anexo 11 Prueba de promedios para el contenido de Hierro

Grupo	Media (ppm)	Tratamiento Kg*ha-1
A	55,40	0
B	39,933	15.000
B	33,933	5.000
B	33,500	10.000

Valores con la misma letra no difieren significativamente (Prueba de Duncan <0,05).

Anexo 12. Análisis de varianza para contenido de Cu entre tratamientos

Fuente	GL	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	Valor F	Pr > F
Modelo	3	278.5558333	92.8519444	1505.71	<.0001
Error	8	0.4933333	0.0616667		
Total	11	279.0491667			

Anexo 13. Prueba de promedios para el contenido de Cu

Grupo	Media (ppm)	Tratamiento Kg*ha-1
A	12.9000	0
B	2.0000	15.000
B	1.6667	10.000
B	1.6667	5.000

Valores con la misma letra no difieren significativamente (Prueba de Duncan <0,05).

Anexo 14. Análisis de varianza para contenido de B entre tratamientos

Fuente	GL	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	Valor F	Pr > F
Modelo	3	0.37389167	0.12463056	44.25	<.0001
Error	8	0.02253333	0.00281667		
Total	11	0.39642500			

Anexo 15. Prueba de promedios para el contenido de B

Grupo	Media (ppm)	Tratamiento Kg*ha-1
A	0.73000	15000
B	0.56333	10000
C	0.35667	5000
C	0.28000	0

Valores con la misma letra no difieren significativamente (Prueba de Duncan <0,05

Anexo 16. Análisis de varianza para contenido de Zn entre tratamientos

. Fuente	GL	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	Valor F	Pr > F
Modelo	3	13.85583333	4.61861111	14.25	0.0014
Error	8	2.59333333	0.32416667		
Total	11	16.44916667			

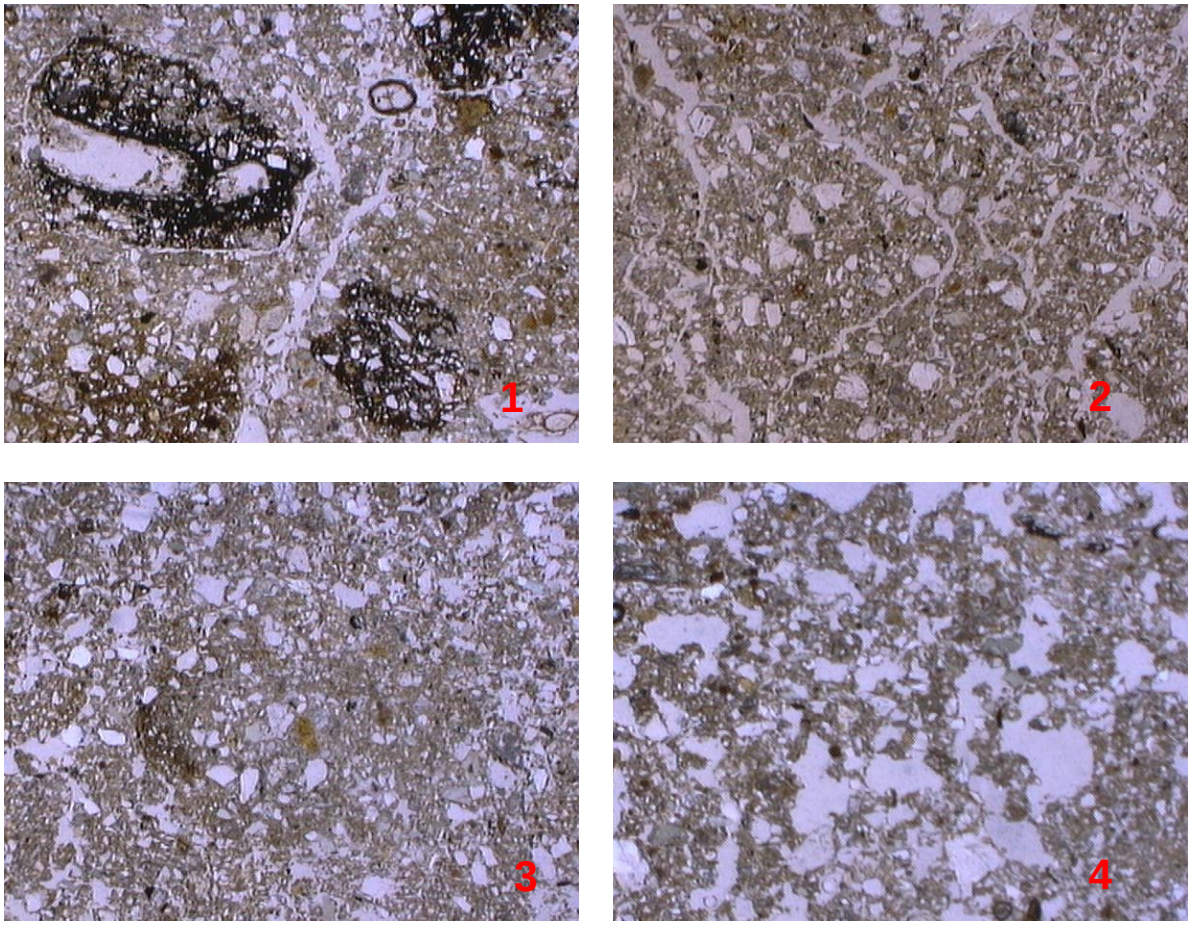
Anexo 17. . Prueba de promedios para el contenido de Zn

Grupo	Media (ppm)	Tratamiento Kg*ha-1
A	3.5333	10000
B	2.7000	15000
C	2.5333	5000
C	0.6000	0

Valores con la misma letra no difieren significativamente (Prueba de Duncan <0,05)

Anexo 18. Microfotográfias de láminas delgadas de suelo.

.



1. Kg*ha-1 de vinaza al inicio del experimento; **2.** 5000Kg*ha-1 de vinaza 6mdda; **3**. 15000Kg*ha-1 de vinaza inicio del experimento. **4**.15000Kg*ha-1 de vinaza 6mdda

Anexo 19 Resultados análisis micromorfológicos de lámina delgada de suelo

.

INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI

RESULTADOS ANÁLISIS MICROMORFOLÓGICO

DIVISIÓN LABORATORIO NACIONAL DE SUELOS

FECHA DE SOLICITUD: DÍA 09 MES 03 AÑO 2009

NOMBRE Y APELLIDO / EMPRESA: TATIANA QUIROZ
DEPARTAMENTO: VALLE DEL CAUCA
MUNICIPIO: CALI
LOCALIZACIÓN: NO ESPECIFICA
PROYECTO: N.A.
IDENTIFICACIÓN DE CAMPO: 412
PROFUNDIDAD: NO ESPECIFICA
No. DE LABORATORIO: 3-79385
SUPLEMENTO DE RESULTADOS: [ ] DE FECHA:

COMPONENTES MINERALES GRUESOS

Tipo minerales: Feldespato, cuarzo,anfíboles, muscovita
Cantidad: Alrededor del 70%.
Tamaño: Heterométrico.
Forma: Prismas (feldespatos y anfíboles), granos Irregulares (cuarzo).
Observaciones: Baja selección de las partículas; baja meteorización, cristales frescos sin alterar.

FRAGMENTOS DE ROCA

Naturaleza: Metamorfica (Cuarcita, gneis y esquistos)
Cantidad: Menos del 5%
Tamaño: Heterométrico.
Forma: Granos irregulares.
Observaciones: Predominan las cuarcitas.

COMPONENTES MINERALES FINOS

Naturaleza: arcilla con hierro.
Color: Pardo amarillento claro.
Grado de transparencia
Opaca [ ] Moteada [X] Nubosa [ ]
Punteada [X] Transparente [ ]
Componente orgánico grueso
Raíces [X] Organos [ ] Tejidos [ ]
Otros [ ]

AGREGACIÓN

Tipo agregados: Bloques subangulares.
Grado desarrollo
Fuerte [ ] Moderado [ ] Débil [X]
Tipo microestructura: Blocosa subangular
Observaciones: Hay un alto % del material de suelo con tendencia a la masividad.

MASA BASAL

CONTEXTURA BIRREFRINGENTE DE LA MICROMASA

Indiferenciada		Granoestriada	
Moteada en puntos	X	Estriada paralela	
Moteada en mosaico		Estriada reticulada	
Poroestriada		Estriada total	
Monoestriada		Cristalítica	

Observaciones: Se denomina Stipple - speckled B - Fabric (Tendencia a insépica de Brewer.

HUECOS (POROS)

Empaquetamiento: Simple [ ] Complejo [ ] Compuesto [ ]
Otros: Vesículas [ ] Cavidades [X] Planos [X]
Canales [X] Cámaras [ ]
Suavidad / Rugosidad paredes: Ondulada
Tamaño y cantidad: Tamaño de macroporos. Frecuentes (15 -30%)
Observaciones: Predominan los canales, menor cantidad las cavidades (Tipo ovoide) que son los poros de mayor tamaño.

DISTRIBUCIÓN RELACIONADA c/f (grueso/fino)

Mónica	
Gefúrica	
Enáulica	
Porfírica	X
Quitónico	

Observaciones: Del tipo espacio simple (Granos minerales muy próximos entre si).

EDAFORRASGOS

REVESTIMIENTOS [X] HIPOVESTIMIENTOS [ ] CUASIREVESTIMIENTOS [ ]

Ubicación y cantidad: Paredes poros de nódulos nucleicos; ocasionales (2-5%)
Naturaleza del material: Carbonato de calcio (Esparita y menor Micrita. Ver imagén)
Contextura interna (texturales): Laminada [ ] No laminada [ ] Capas [ ]
Capas compuestas [X] Microlaminada [ ]
Tipo (Hipo/cuasi): Empobrecimiento [ ] Impregnativo [ ] Contextura [ ]
Obeervacionee: El proceso de los reveetimientos de carbonato es actual y afecta a los nódulos nucleicos porosos (Poros grandes). Son espesos. Hay muy pocos (< 2%) de los revestimientos en canales de hematita.

NÓDULOS

Contextura: Típico [X] Concéntrico [ ] Nucleico [X] Halos [ ] Pseudomórfico [ ]
Tipos: Puro [X] Pseudomorfico [ ] Impregnativo [X]
Grado impregnación: Fuerte [X] Moderado [ ] Bajo [ ]
Límite impregnación: Neto [X] Difuso [ ]
Naturaleza del material: Tipicos son CaCO3 (puro) y nucleico de hierro (impregnativo)
Cantidad y tamaño: Tipicos < 2%, nucleico < 5%.
Observaciones: Nucleico el hierro es hematita. Hay fragmentos (Escasos) de carbón vegetal y restos de vegetales en proceso alto de humificación.

MÉTODOS: Análisis micromorfológico en sección delgada con microscopio petrográfico.

NOTA: Los resultados en la base de datos y los enviados por fax o e-mail se conservarán por un periodo máximo de tres meses a partir de la entrega de los mismos.

Cualquier sugerencia, observación o reclamo favor comunicarse al teléfono 3694016 ó 3694000 Ext. 4016.

Prohibida la reproducción parcial sin autorización escrita del Laboratorio.

APROBADO POR FUNCIONARIO RESPONSABLE DEL ANÁLISIS:

NOMBRE _____ FIRMA _____

Anexo 20 Análisis de varianza realizado en la prueba estabilidad de agregados en húmedo.

Fuente	GL	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	Valor F	Pr > F	R^2	C.V
MUESTREO	2	0.228	0.1142	24.85	<.0001	0.728594	20.09131
TRATA	3	0.019	0.0066	1.44	0. 2504		
MUESTREO*TRATA	6	0.158	0.0264	5.76	0.0004		

Anexo 21**.** Pruebas de promedios por muestreos en la prueba de estabilidad de agregados en húmedo.

Grupo	Media (ppm)	Época (mdda)
A	0.44645	4
AB	0.30226	2
B	0.28046	6

Valores con la misma letra no difieren significativamente (Prueba de Duncan <0,05)

Anexo 22. Análisis de varianza de los diferentes tamices, para la distribución de agregados en seco

ANAVA tamiz 6.3mm

Fuente	GL	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	Valor F	Pr > F	R^2	C.V
TRATA	3	140.905	46.968	1.07	0.3862	0.662155	27.78697
TRATA*MUESTREO	6	248.177	41.362	0.95	0.4886		
MUESTREO	2	479.364	239.682	5.48	0.0145		
MUESTREO*REPET	6	123.563	20.593	0.47	0.8203		
TRATA*REPET	9	388.175	43.130	0.99	0.4849		

ANAVA tamiz 4mm

Fuente	GL	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	Valor F	Pr > F	R^2	C.V
TRATA	3	40.073	13.357	2.47	0.0970	0.781	14.649
TRATA*MUESTREO	6	23.325	3.887	0.72	0.6401		
MUESTREO	2	159.310	79.655	14.73	0.0002		
MUESTREO*REPET	6	39.481	6.580	1.22	0.3455		
TRATA*REPET	9	35.239	3.915	0.72	0.6819		

ANAVA tamiz 2mm

Fuente	GL	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	Valor F	Pr > F	R^2	C.V
TRATA	3	45.284	15.094	3.69	0.0327	0.852	11.571
TRATA*MUESTREO	6	33.756	5.626	1.37	0.2804		
MUESTREO	2	265.411	132.705	32.42	<.0001		
MUESTREO*REPET	6	6.959	1.159	0.28	0.9369		
TRATA*REPET	9	39.353	4.372	1.07	0.4318		

ANAVA tamiz 1mm

Fuente	GL	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	Valor F	Pr > F	R^2	C.V
TRATA	3	4.445	1.481	1.10	0.3748	0.584	10.74
TRATA*MUESTREO	6	8.235	1.372	1.02	0.4440		
MUESTREO	2	3.534	1.767	1.32	0.2940		
MUESTREO*REPET	6	2.029	0.338	0.25	0.9517		
TRATA*REPET	9	6.452	0.716	0.53	0.8302		

ANAVA tamiz 0.5mm

Fuente	GL	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	Valor F	Pr > F	R^2	C.V
TRATA	3	8.178	2.726	0.92	0.4524	0.58	18.24
TRATA*MUESTREO	6	18.255	3.042	1.03	0.4418		
MUESTREO	2	16.841	8.420	2.84	0.0862		
MUESTREO*REPET	6	6.185	1.03	0.35	0.9015		
TRATA*REPET	9	14.725	1.636	0.55	0.8169		

ANAVA tamiz 0.25mm

Fuente	GL	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	Valor F	Pr > F	R^2	C.V
TRATA	3	8.720	2.906	1.23	0.3286	0.769	21.54
TRATA*MUESTREO	6	29.681	4.946	2.10	0.1074		
MUESTREO	2	45.933	22.966	9.74	0.0015		
MUESTREO*REPET	6	13.026	2.171	0.92	0.5045		
TRATA*REPET	9	23.986	2.665	1.13	0.3947		

ANAVA tamiz 0.125mm

Fuente	GL	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	Valor F	Pr > F	R^2	C.V
TRATA	3	3.669	1.223	0.60	0.6233	0.767	19.025
TRATA*MUESTREO	6	9.557	1.592	0.78	0.5953		
MUESTREO	2	41.103	20.551	10.09	0.0013		
MUESTREO*REPET	6	8.705	1.450	0.71	0.6444		
TRATA*REPET	9	35.001	3.889	1.91	0.1198		

ANAVA tamiz <0.125mm

Fuente	GL	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	Valor F	Pr > F	R^2	C.V
TRATA	3	21.824	7.274	1.48	0.2548	0.79	27.69
TRATA*MUESTREO	6	84.533	14.088	2.87	0.0405		
MUESTREO	2	128.465	64.232	13.09	0.0004		
MUESTREO*REPET	6	37.886	6.3144	1.29	0.3149		
TRATA*REPET	9	31.006	3.445	0.70	0.6993		

Anexo 23 Clasificación de la estabilidad estructural según la cantidad de agregados con diámetro menor de 0,5mm. (Montenegro y Malagon, 1990)

Cantidad de agregados de Θ < 0,5 mm (%)	Estabilidad Estructural
< 10	Muy alta
10,1 – 20	Alta
20,1 – 40	Media
40,1 - 50	Baja
> 50,1	Muy baja

Anexo 24 Análisis de varianza para la variable DPM, en los tratamientos aplicados en la prueba de estabilidad de agregados en seco.

Fuente	GL	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	Valor F	Pr > F	R^2	C.V
TRATA	3	0.342	0.114	0.97	0.4173	0.643	11.606
MUESTREO	2	5.793	2.896	24.64	<.0001		
TRATA*MUESTREO	6	0.874	0.145	1.24	0.3103		

Anexo 25 Prueba de promedios por muestreos para la variable DPM en los tratamientos aplicados para la prueba de estabilidad de agregados en seco.

Grupo	Media (mm)	Época (mdda)
A	3.4796	2
B	2.7839	6
B	2.6325	4

Valores con la misma letra no difieren significativamente (Prueba de Duncan <0,05)

Anexo 26 Análisis de varianza para la variable DPM, en la prueba resistencia de los agregados a una fuerza de impacto.

Fuente	GL	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	Valor F	Pr > F	R^2	C.V
REPET	3	30.853	10.284	0.67	0.589	0.846	16.365
VINAZAS	3	32.951	10.983	0.72	0.5652		
VINAZAS*REPET	9	137.4404	15.271	7.84	<.0001		
ENERGIA	5	439.696	87.939	45.13	<.0001		
VINAZAS*ENERGIA	15	6.237	0.415	0.21	0.4611		
VINAZA*ENERGIA*REPET	60	24.791	0.4131	0.21	1.0000		
MUESTREO	2	615.554	307.777	157.96	<.0001		
MUESTREO*VINAZAS	6	113.595	18.932	9.72	<.0001		
MUESTREO*ENERGIA	10	28.236	2.823	1.45	0.1652		
MUESTR*VINAZA*ENERGI	30	11.642	0.388	0.20	1.0000		

Anexo 27 Prueba de promedios para niveles de energía en la prueba de estabilidad determinada por resistencia a una fuerza de impacto

Grupo	Media (mm)	Energia (Joul)
A	10,70	2
B	9,41	4
C	8,77	6
D	7,99	8
E	7,31	10
F	6,96	12

Valores con la misma letra no difieren significativamente (Prueba de Duncan <0,05).

Anexo 28 Prueba de promedios por muestreos para la variable DPM en la estabilidad determinada por resistencia a una fuerza de impacto

.

Grupo	Media (mm)	Época (mdda)
A	10.556	2
B	7.819	4
C	7.167	6

Valores con la misma letra no difieren significativamente (Prueba de Duncan <0,05)

Anexo 29 Análisis de varianza para la variable energía (J/m²), en la prueba resistencia de los agregados a la compresión

.

Fuente	GL	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	Valor F	Pr > F	R^2	C.V
REPET	3	759.366	253.122	1.25	0.3158	0.652	46.768
TRAT	3	2185.944	728.648	2.63	0.1138		
TRAT*REPET	9	2490.375	276.708	1.37	0.2626		
MUES	2	775.723	387.861	1.92	0.1714		
TRAT*MUES	6	1826.074	304.345	1.51	0.2243		

Anexo 30 Prueba de promedios para la energía en la prueba de estabilidad determinada por resistencia a la compresión

.

Grupo	Media (J/m²)	Muestreo (mdda)
A	36.797	4
AB	30.527	2
B	22.909	6

Valores con la misma letra no difieren significativamente (Prueba de Duncan <0,17).