



**EFFECTO DE LA APLICACIÓN DE BIOSÓLIDOS SOBRE
ALGUNAS PROPIEDADES HIDRODINÁMICAS DEL SUELO Y
AGRONÓMICAS DE UN CULTIVO DE CAÑA (*Saccharum
Officinarum*)**

**LAURA ELEANOR COLLAZOS RIVERA
ANTHONY DEL VALLE SALAZAR**

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERIA
SANTIAGO DE CALI
2013**

**EFFECTO DE LA APLICACIÓN DE BIOSÓLIDOS SOBRE ALGUNAS
PROPIEDADES HIDRODINÁMICAS DEL SUELO Y AGRONÓMICAS DE
UN CULTIVO DE CAÑA (*Saccharum Officinarum*)**

**LAURA ELEANOR COLLAZOS RIVERA
ANTHONY DEL VALLE SALAZAR**

**Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:
Ingeniería Agrícola**

Director:

**NORBERTO URRUTIA COBO, Ing. Agrícola; Ph D.
GRUPO DE INVESTIGACIÓN REGAR – Universidad del Valle**

Codirector:

**WALDEMAR PEÑARETE MURCIA
Ing. Agrícola. MsC.en Ing. Sanitaria y Ambiental.**

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
ESCUELA DE RECURSOS NATURALES Y DEL MEDIO AMBIENTE
INGENIERÍA AGRÍCOLA
SANTIAGO DE CALI, COLOMBIA
2013**



FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA ACADÉMICO DE INGENIERÍA AGRÍCOLA

ACTA DE APROBACIÓN TRABAJO DE GRADO

El trabajo de investigación titulado “EFECTO DE LA APLICACIÓN DE BIOSÓLIDOS SOBRE ALGUNAS PROPIEDADES HIDRODINÁMICAS DEL SUELO Y AGRONÓMICAS DE UN CULTIVO DE CAÑA (*Saccharum Officinarum*)” presentado por los estudiantes: Laura Eleanor Collazos Rivera y Anthony Del Valle Salazar, en cumplimiento parcial de los requisitos para optar al título de Ingeniero Agrícola, por el jurado evaluados el día ____ de _____ de 2013.

Ing. MsC. Martha Constanza Daza
Jurado Evaluador

Ing Javier Jaramillo
Jurado Evaluador

Ing. PhD. Norberto Urrutia Cobo.
Director Trabajo de grado

Ing. Waldemar Peñarete Murcia
Codirector Trabajo de Grado

Apartado aéreo 25360 edificio 344 segundo piso

E-Mail: ingeagricola@univalle.edu.co

Cali – Colombia

DEDICATORIA

A Dios por iluminarme a lo largo de mi camino, a mi mamá María Rivera a quien amo desde lo más profundo de mi corazón, y mi hermana Nancy Collazos, quienes son objeto de mi orgullo y admiración.

A mis amigos más importantes: Edwin García, Diana Echeverri, Diana Valencia y Leidy Agudelo, quienes han compartido mis alegrías y tristezas a lo largo de mi camino, su apoyo y consejos me han ayudado a crecer como persona, los quiero mucho. Y al resto de mis amigos, quienes tienen un lugar importante en mi corazón.

Laura C.

Este trabajo está dedicado a la mujer que amo, que me dio la vida y la formación como persona para poder lograr cada una de mis metas, mi madre Noralba.

Segundo está dedicado a la gran mujer luchadora que siempre ha estado ahí y es un eje en mi vida, mi hermana Lorena. También es dedicado a mi padre, William y a toda mi familia que me ha apoyado.

Anthony.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad del Valle, COLCIENCIAS Y EMCALI, por permitir la participación y realización del proyecto.

A los profesores Norberto Urrutia y Waldemar Peñarete, directores del proyecto.

A la Universidad del Valle y a los docentes nos formaron a lo largo de nuestra carrera.

A los compañeros de tesis Jimmy Peña, Diego Bedoya, por su aporte durante la fase experimental.

Al personal de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Cañaveralejo y a aquellos que indirecta o directamente colaboraron en la culminación del presente proyecto.

RESUMEN

Debido a la excesiva explotación agrícola y con el fin de mantener la capacidad productiva de los suelos, es evidente la necesidad de una constante reposición de nutrientes, por lo cual técnicas tradicionales de aporte de éstos a los suelos como la fertilización con agroquímicos, muchas veces pueden ser limitados ya que pueden lixiviarse al agua subterránea o ser arrastradas por aguas superficiales, además no mejoran la estructura del suelo, contrario con lo que pasa con los abonos de origen orgánico que tiene la capacidad de mejorar y mantener la estructura del suelo, aumentar la capacidad de retención de humedad y facilitar la disponibilidad de nutrimentos para las plantas (Castellanos, 1982), por ello el uso de abonos de origen orgánico es una alternativa favorable tanto económica como productiva.

Debido al gran consumo interno de fertilizantes químicos y a sus altos costos, en Colombia, el aprovechamiento agrícola de los biosólidos es una opción considerable. Según Tovar (2007) Colombia es el tercer consumidor de fertilizantes después de Brasil y Argentina y su consumo representa el 0.5% del consumo mundial, de estos, el 85% son importados, mientras que el 15% son de producción nacional.

No obstante, los estudios con relación a los efectos de los biosólidos tanto en las propiedades agronómicas de los cultivos, como en las propiedades físicas y químicas de los suelos, recién se están explorando. En este proyecto de investigación se realizó un análisis del efecto de los biosólidos generados en la planta de tratamiento de aguas residuales de Cañaveralejo (PTAR-C), perteneciente a la ciudad de Santiago de Cali, sobre algunas propiedades hidrodinámicas del suelo y algunas propiedades agronómicas de un cultivo de caña de azúcar.

Esta investigación se llevó a cabo en una parcela de 0.98 ha, perteneciente a las instalaciones de la PTAR-C; el diseño experimental se basó en bloques completos al azar con dos repeticiones, en los cuales se aplicaron tres tratamientos que consistieron en: Testigo (T1), biosólido al 100% de la dosis de requerimiento de nitrógeno (T2) y biosólido al 200% de la dosis de requerimiento de nitrógeno (T3). Cada bloque constó de 3 tratamientos, con 3 surcos por tratamiento para un total de 18 surcos. El factor de bloqueo se determinó con base al aporte de nutrientes por parte del biosólido, en especial a la dosis de nitrógeno requerido para el normal desarrollo del cultivo.

Las variables de respuesta para las propiedades hidrodinámicas consistieron en: la conductividad hidráulica e infiltración; para las propiedades agronómicas consistieron en: la altura del tallo, el grosor y la distancia entre nodos. Los resultados mostraron algunas diferencias significativas para las propiedades agronómicas del cultivo, sin embargo estas diferencias no se presentaron en las propiedades hidrodinámicas del suelo. Los resultados se atribuyeron al tipo de suelo en el cual se llevó a cabo la investigación y a otros factores como el clima, concluyéndose que los cambios presentados no se debieron al efecto de los biosólidos sino a los factores anteriormente mencionados.

Palabras clave: *Biosólidos, caña de azúcar, clima, materia orgánica, propiedades agronómicas del cultivo, propiedades hidrodinámicas del suelo*

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	13
2. ANTECEDENTES.....	15
3. MARCO TEÓRICO	20
3.1 BIOSÓLIDOS.....	20
3.1.1 Estabilización de los biosólidos	20
3.2 EL SUELO	25
3.2.1 Propiedades hidrodinámicas del suelo	25
3.2.1.1 Infiltración	25
3.2.1.2 Conductividad hidráulica.....	28
3.2.2 Propiedades Físicas del suelo.....	30
3.2.2.1 Textura	30
3.2.2.2 Estructura	30
3.2.2.3 Porosidad	31
3.2.2.4 Densidad Aparente	31
3.2.3 Materia orgánica.....	32
3.3 CULTIVO DE CAÑA DE AZÚCAR (<i>Saccharum Officinarum</i>).....	33
3.3.1 Desarrollo general del cultivo	34
3.3.2 Variedad CC 85-92.....	34
3.3.3 Morfología	35
3.3.4 Clima y temperatura	36
4. OBJETIVOS	37
4.1 OBJETIVO GENERAL	37
4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	37
5. METODOLOGÍA.....	38
5.1 DISEÑO EXPERIMENTAL.....	38

5.1.1	Localización	38
5.1.2	Tratamientos Implementados	39
5.1.3	Tipos de Variables.....	41
5.2	PROCEDIMIENTO Y REGISTRO DE DATOS.....	41
5.2.1	Preparación del terreno, aplicación del biosólido y control.	41
5.2.2	Obtención y registro de las variables.....	45
5.3	ANÁLISIS DE DATOS	46
5.3.1	Modelo matemático para las propiedades hidrodinámicas del suelo	46
5.3.2	Modelo matemático para las propiedades agronómicas del cultivo	47
6.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	48
6.1	CARACTERIZACIÓN INICIAL DEL SUELO Y DEL AGUA DE RIEGO	48
6.1.1	Caracterización del suelo	48
6.1.2	Caracterización del agua de riego	52
6.2	CARACTERIZACIÓN DEL BIOSÓLIDO CON TRATAMIENTO ALCALINO	54
6.3	PROPIEDADES HIDRODINÁMICAS DEL SUELO	55
6.3.1	Infiltración.....	55
6.3.2	Conductividad hidráulica saturada.....	59
6.4	PROPIEDADES AGRONÓMICAS	61
6.4.1	Altura del tallo	61
6.4.2	Grosor del tallo.....	62
6.4.3	Distancia entre nodos.....	64
7.	CONCLUSIONES.....	67
8.	RECOMENDACIONES.....	68
9.	BIBLIOGRAFÍA.....	69
10.	ANEXOS	77

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Métodos para la estabilización de sólidos de las aguas residuales.	21
Tabla 2. Parámetros para la categorización de los biosólidos.	23
Tabla 3. Caracterización inicial del biosólido PTAR-Cañaveralejo, Cali.	24
Tabla 4. Interpretación de la velocidad de infiltración básica.	27
Tabla 5. Interpretación de los valores de conductividad hidráulica.	28
Tabla 6. Descripción de los tratamientos implementados.	39
Tabla 7. Propiedades hidrodinámicas, determinación del método para su evaluación y cronograma de pruebas.	45
Tabla 8. Caracterización física del suelo en estudio.	49
Tabla 9. D_a (Mg/m^3), macro y micro porosidad (%) para los tratamientos en el periodo de estudio.	49
Tabla 10. Caracterización química del suelo en estudio.	50
Tabla 11. Porcentaje de saturación en el complejo de cambio.	51
Tabla 12. Caracterización química del agua de riego.	52
Tabla 13. Caracterización química del biosólido producido en la PTAR-C con tratamiento alcalino.	54
Tabla 14. Infiltración básica para los periodos de estudio establecidos.	55
Tabla 15. Conductividad hidráulica para los tratamientos evaluados en el periodo de estudio.	59
Tabla 16. Comportamiento de la altura para el periodo de estudio evaluado.	62
Tabla 17. Comportamiento del grosor para el periodo de estudio evaluado.	63
Tabla 18. Comportamiento de la distancia para el periodo de estudio evaluado.	65
Tabla 22. Formato de registro de datos para la prueba de conductividad hidráulica.	78
Tabla 23. Formato de registro de datos para la prueba de Infiltración.	79
Tabla 24. Formato de registro de datos de las propiedades agronómicas del cultivo.	81

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR-C).Fuente: EMCALI, 2000	38
Figura 2. Disposición de los tratamientos implementados. (Vista Superior, unidades en m).	
.....	40
Figura 3. Distribución de los bloques en el campo.	41
Figura 4. Labores de preparación del terreno para la siembra del cultivo.	42
Figura 5. Incorporación de los biosólidos en campo.	43
Figura 6. Siembra de la semilla en campo.	43
Figura 7. Sistema de riego implementado.....	44
Figura 8. Control de malezas en el campo.....	44
Figura 9. Normas Riverside: Diagrama para clasificar las aguas de riego según el U.S. Salinity Laboratory Staff (1954).Fuente: Urbano, 1995.	53
Figura 10. Curvas de infiltración básica para los tratamientos evaluados en el mes 4.	56
Figura 11. Curvas de infiltración básica para los tratamientos evaluados en el mes 10. ..	57
Figura 12. Curvas de infiltración básica para los tratamientos evaluados en el mes 12. ..	57
Figura 13. Comportamiento de la precipitación y evaporación para el desarrollo del cultivo.Fuente: URL-1.	58
Figura 15. Altura del tallo para los distintos tratamientos durante el periodo de estudio...	61
Figura 16. Grosor del tallo para los distintos tratamientos durante el periodo de estudio.	63
Figura 17. Distancia entre nodos para los distintos tratamientos durante el periodo de estudio.....	65
Figura 18. Prueba de conductividad hidráulica.	77
Figura 19. Prueba de infiltración.	79

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A. MÉTODO DE MUESTREO EN CAMPO PARA EL ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES HIDRODINÁMICAS DEL SUELO	78
ANEXO B. MÉTODO DE MUESTREO EN CAMPO PARA EL ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES AGRONÓMICAS DEL CULTIVO.....	82
ANEXO C. ANOVA PARA LAS PROPIEDADES HIDRODINAMICAS DEL SUELO.....	83
ANEXO D. ANOVA PARA LAS PROPIEDADES AGRONÓMICAS DEL CULTIVO	84
ANEXO E. PRUEBA POST-ANOVA (PRUEBA DE TUKEY) PARA LAS PROPIEDADES AGRONÓMICAS DEL CULTIVO	89
ANEXO F. INFORME ANÁLISIS DE AGUA DE RIEGO PTAR-C	91

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente el crecimiento de la población urbana ha generado un aumento en la producción de aguas residuales, lo que ha dado lugar a la construcción de plantas de tratamiento, las cuales generan subproductos, como los lodos. Estos lodos comúnmente son procesados para convertirse en biosólidos, y estos a su vez son sometidos a tratamientos para su estabilización

Caracterizar los biosólidos es fundamental para una adecuada gestión, dependiendo de su calidad, se da prelación a una u otra alternativa de aprovechamiento, como la recuperación de suelos degradados, el mejoramiento de terrenos para cultivo, la silvicultura, la fabricación de materiales para construcción, la recuperación de suelos contaminados por hidrocarburos y el aprovechamiento energético por incineración (Vélez, 2007).

En Colombia, se generan diariamente 274 toneladas de biosólidos (94 toneladas base seca); de las cuales el 97% de la producción es generada por tres plantas: El Salitre (Bogotá D.C), Cañaveral (Santiago de Cali, Valle del Cauca) y San Fernando (Medellín, Antioquia). En general los biosólidos que son producidos en las PTAR de Colombia contienen menor cantidad de metales pesados que aquellos generados en EEUU y la Unión Europea. Por este motivo se viene incorporando los biosólidos cada vez más en el uso agrícola y se genera la necesidad de poder tratarlos y adaptarlos a cultivos de forma que haya una respuesta positiva en el suelo y en el desarrollo agronómico del cultivo debido al aporte de materia orgánica y de nutrientes (Daguer, 2003).

Es así como se decide desarrollar el proyecto en un cultivo de caña de azúcar debido a que, después del café, la caña de azúcar es el segundo cultivo agrícola de mayor importancia en la economía del país. La industria azucarera se concentra en su mayor parte en el Valle geográfico del río Cauca, de los 14 ingenios azucareros existentes en Colombia, 13 factorías están ubicadas en dicha zona (Ocampo y Guerrero,

1994).Actualmente el sector genera 34.000 empleos, con un área sembrada en promedio de 205.000 ha (Ramos, 2005).

Además de evaluar el comportamiento del cultivo bajo la aplicación de biosólidos, se tiene presente la respuesta positiva del suelo con el uso de abonos orgánicos con el propósito de mejorar sus propiedades, tales como la textura y la capacidad de absorción de agua, que brindan condiciones más favorables para el crecimiento de las raíces e incrementan la tolerancia de la vegetación a la sequía, además proveen nutrientes esenciales para el crecimiento vegetal, incluyendo el nitrógeno y el fósforo, así como algunos micronutrientes esenciales, tales como el zinc y el cobre.

Por lo anterior, con esta investigación se buscó analizar los efectos en algunas propiedades hidrodinámicas del suelo y agronómicas del cultivo de caña, generadas por la incorporación de biosólido previamente tratado, fortaleciendo las investigaciones sobre el uso de biosólidos y buscando su aprovechamiento sustentable.

2. ANTECEDENTES

La producción de biosólidos a partir del tratamiento de aguas residuales no es nueva en el mundo. Su utilización se ha reportado desde antes de 1920, y su investigación se ha realizado desde hace más de 30 años, sólo hasta hace una década se han creado normas que regulan su aprovechamiento en actividades agrícolas y no agrícolas, así como su disposición (Vélez, 2007).

La aplicación de biosólidos al suelo representa un suministro importante de nutrientes y micronutrientes esenciales para las plantas. Además el contenido de materia orgánica, puede estar por encima del 40% del peso seco, mejorando la estructura del suelo, la porosidad e incrementando la capacidad de retención de agua, su fertilidad, y la actividad microbiológica del suelo (Clapp *et al.*, 1994).

Está comprobado que el incremento del contenido de materia orgánica del suelo por su aporte de N orgánico, aumenta el contenido de N mineral disponible para los cultivos y por su nivel de nutrientes influye en la concentración de fósforo, calcio, potasio, magnesio, cinc, boro y cobre del suelo. Por lo tanto, el uso de biosólidos en agricultura es importante en muchos países como un sustituto parcial de los fertilizantes y como un corrector de las propiedades físicas, lo cual se hace evidente cuando se usan como enmienda en suelos degradados. La Unión Europea, Estados Unidos y otros países desarrollados destinan un porcentaje importante de los biosólidos para la agricultura, llegando en algunos casos al 60% (Merli y Ricciuti, 2009).

La principal preocupación de la aplicación de biosólidos en terrenos agrícolas fue durante mucho tiempo el contenido de metales pesados; sin embargo, se estableció que debido al bajo contenido de contaminación química presente en los lodos generados en una PTAR (Ingallinela *et al.*, 2001), el riesgo de afectación en la salud pública y en el ambiente es mínimo.

A continuación se presentan diversas investigaciones que han demostrado los efectos de la utilización de los biosólidos generados en las PTAR en el suelo y los cultivos:

Puet *et al.*, (2004), evaluaron el efecto de la aplicación al suelo de un biosólido tratado aerobiamente (AE) y uno anaerobiamente (AN) a la producción de un cultivo de sorgo forrajero y al mejoramiento de los nutrientes en un suelo aluvial franco arcilloso ubicado al sureste de Queensland Australia. La cantidad de biosólidos aplicada fue de 7, 14, 42 y 63 ton/ha para la AE y 10, 20, 60 y 90 ton/ha para los biosólidos AN. Se encontró que la aplicación de biosólidos en general, aumentó la producción de sorgo forrajero (20,7 a 26,8 ton /ha), en comparación con el control no fertilizado (16,3 ton/ha) y el control fertilizado (17,6 ton/ha). Tanto en los biosólidos AE y AN, se encontró en el material vegetal cantidades significativas de macro y micro nutrientes como: nitrógeno, potasio, fósforo, cadmio, cobre y zinc, en comparación con las parcelas no tratadas. La aplicación de ambos biosólidos incrementó el nitrato y el fósforo total, pero no el carbono total del suelo, incluso para las más altas tasas de aplicación medidos al final del experimento.

Tsadilas *et al.*, (2005), evaluaron la influencia de la aplicación de biosólidos en algunas propiedades físicas de un suelo cultivado con algodón (*Gossypium hirsutum*, var. corina). Este experimento se realizó durante tres años sobre un suelo franco-arcilloso, ubicado en Grecia Central. El diseño experimental es completamente aleatorio y se distribuyó en cuatro bloques de 0, 10, 30, 50 toneladas de biosólidos por ha/año para los cuales se realizaron cuatro repeticiones. Estos biosólidos fueron obtenidos de la PTAR de la ciudad de Vólos. Los datos experimentales obtenidos mostraron un incremento significativo en el contenido de materia orgánica, la capacidad de retención de agua, el agua disponible y la tasa de infiltración. Pero también revelaron un decrecimiento en la densidad aparente, así como también en el índice de estabilidad de agregados. Con respecto al cultivo de algodón se demostró una relación de tipo lineal positivo entre el contenido de M.O y el rendimiento en la cosecha de este cultivo, siendo este rendimiento mejor a mayor contenido de biosólidos.

Borges(2006) evaluó el uso agrícola de los biosólidos de aguas residuales urbanas y su efecto en algunas propiedades del suelo y la respuesta fisiológica del tomate (*Lycopersicon esculentum Mill*). El trabajo de investigación se desarrolló en San José de las Lajas de la provincia la Habana. Los biosólidos utilizados procedieron de la PTAR del Municipio Marianao de la Ciudad de La Habana. El diseño experimental se ejecutó con los siguientes tratamientos: Suelo natural (S), Suelo tratado con fertilizante mineral (F), 95 g biosólidos/kg de suelo (B95), 115 g biosólidos/kg de suelo (B115), 135 g biosólidos/kg de suelo (B135), 150 g biosólidos/kg de suelo (B150), cada uno con 15 repeticiones. La aplicación de estos residuos provocó que el pH del suelo tomara valores ligeramente básicos y aumentó el contenido de MO, fósforo (P) y calcio (Ca) en el sustrato, a la vez que fueron incrementados los niveles de N, P y proteínas en los órganos vegetales, logrando el mayor desarrollo vegetativo de las plantas de tomate cuando se trató el suelo con 135 y 150 g biosólidos/kg de suelo. De forma general, se demostró que el uso de los biosólidos con fines agrícolas es una alternativa viable y susceptible de ser puesta en práctica en sistemas de explotaciones agrícolas.

Ramírez y Pérez (2006), evaluaron el potencial de los biosólidos procedentes del tratamiento de aguas residuales para uso agrícola y su efecto sobre el cultivo de rábano rojo (*Raphanus sativus L.*). Este experimento se realizó durante 35 días en predios de la planta de tratamiento de aguas residuales “El Salitre”, localizada en la ciudad de Bogotá, Los tratamientos correspondieron a mezclas de biosólidos con suelo en las siguientes proporciones: 100% biosólido, 75%, 50%, 25% y 100% suelo como control.. El diseño experimental correspondió a bloques completos al azar con 5 tratamientos y tres repeticiones. Las variables evaluadas fueron: porcentaje de germinación, peso seco de hojas y raíz, longitud de la planta, área foliar y producción. Los resultados evidenciaron que los tratamientos 50% biosólido y 25% biosólido, son los que favorecieron el crecimiento, desarrollo y producción del cultivo de rábano, mientras que los tratamientos 75% biosólido y 100% suelo presentaron un menor desarrollo, crecimiento y producción del cultivo. El tratamiento 100% biosólido provocó una baja germinación, además no presentó acumulación de metales pesados en la raíz, que es el producto cosechable.

Ramírez *et al.*, (2007), evaluaron el efecto de la aplicación de biosólidos en el crecimiento de Gualanday (*Jacaranda mimosifolia*) y en las condiciones físicas y químicas de un suelo degradado. Este estudio se realizó durante tres meses en un invernadero, ubicado en la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, para el cual se sembraron plántulas utilizando un diseño completamente al azar con cuatro tratamientos y diez repeticiones. Los tratamientos correspondieron a contenidos de materia orgánica en la mezcla suelo-biosólido de 0%, 2%, 4% y 8%. Se muestreó mensualmente la sobrevivencia, altura, diámetro del tallo y número de hojas, y la biomasa seca al final del experimento. Los tratamientos con 4% y 8% de materia orgánica, afectaron negativamente el crecimiento debido posiblemente a la alta concentración de nutrientes y metales pesados hallados en el suelo, lo que pudo generar toxicidad, antagonismo y/o sinergismo. Las condiciones físicas se favorecieron al adicionar biosólidos, aumentándose la estabilidad de agregados y la retención de humedad y disminuyéndose las densidades aparente y real.

Tasso *et al.*, (2007) evaluaron el efecto de los biosólidos como una fuente de nitrógeno y vinaza como fuenteK, por dos años consecutivos en un cultivo de caña de azúcar(*Saccharum Officinarum*). El experimentose llevó a cabo en un suelo Oxisol Hapludox en Sao Paulo, Brasil con una aplicación del biosólido (5 y 10 ton/ha), y de vinaza (115 y 230 m³/ha) representando el 100 y 200% de la dosis requerida de estos nutrientes, El diseño experimental se presentó en bloques al azar con tres repeticiones. Los parámetros analizados fueron la productividad y las variables tecnológicas (grados brix, contenido de sacarosa de caña y la productividad de la caña). Las variables agronómicas y los rendimientos del cultivo no presentaron mayor diferencia significativa para las distintas dosis aplicadas.

Múnera (2008), evaluó el efecto de la aplicación del biosólido producido en la PTAR de Río Frío (Floridablanca, Santander, Colombia), compostado o estabilizado con cal, y diferentes mezclas de los tratamientos con suelo. Estas mezclas se aplicaron en plantas de lechuga (*Lactuca sativa*), guadua (*Bambusa guadua*)y samán (*Pithecellobium saman*) en el vivero La Rosita, municipio de Bucaramanga, Santander, Colombia. Se realizó un diseño experimental de parcelas divididas en bloques completos al azar con 3 repeticiones para la lechuga y 5 para la guadua y el samán. Las variables medidas fueron: el peso seco de hojas, peso seco de tallo, peso seco de raíz y peso seco total en g/planta; la altura total, cuello de la raíz. Los resultados obtenidos indicaron que elbiosólido

estabilizado con cal dolomítica o cal agrícola, tiene un mejor efecto en el comportamiento de plantas de lechuga; el biosólido sin tratar y el compostado tienen un mejor efecto en las plantas de guadua; este último también presentó un efecto positivo en las plantas de samán.

Franco *et al.*, (2010), evaluaron los efectos de las dosis de aplicación de biosólidos y fertilizantes minerales de N y P en la productividad de un cultivo de caña de azúcar (*Saccharum Officinarum*) para dos cortes. Se aplicaron cuatro dosis de biosólidos (0, 3,6, 7,2 y 10,8 t /ha base seca), de N (0, 30, 60 y 90 kg/ha) y de P_2O_5 (0, 60, 120 y 180 kg/ ha) los cuales se distribuyeron en bloques al azar, con dos repeticiones. Se encontró que la aplicación de biosólidos en combinación con las dosis de N y P_2O_5 , aumentaron el crecimiento del tallo y el contenido de azúcares en comparación con el testigo. También se manifestó un efecto residual de las combinaciones para el segundo corte.

3. MARCO TEÓRICO

3.1 BIOSÓLIDOS

Las políticas de protección del recurso hídrico han fomentado la construcción de plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas (PTAR). Aunque éstas logran controlar en gran medida los problemas de contaminación hídrica, también generan subproductos como los lodos, que requieren de tratamiento para ser convertidos en biosólidos (Daguer, 2003).

Los biosólidos pueden ser utilizados en diversos usos beneficiosos, un ejemplo de tales usos es la incorporación de biosólidos al suelo para suministrarle nutrientes y como aporte de materia orgánica. Los biosólidos se pueden utilizar en terrenos agrícolas, bosques, campos de pastoreo, o en terrenos alterados que necesitan recuperación (EPA, 2000).

La presencia de patógenos, parásitos, metales pesados y plaguicidas puede limitar el potencial como insumo agrícola de los lodos generados en el tratamiento de las aguas residuales municipales (Metcalf y Eddy, 2003), por lo cual se hace necesario un proceso previo de estabilización.

3.1.1 Estabilización de los biosólidos

La estabilización de los lodos involucra procesos físicos, químicos y biológico, con respecto al aprovechamiento agrícola ésta se enfoca en la atenuación o eliminación de algunas características negativas de los lodos, como el olor y la atracción de insectos (SANEPAR, 1999). Para ello se someten a procesos de espesamiento, digestión y deshidratación, adquiriendo así la categoría de biosólidos. La posterior utilización, sus cuidados y restricciones ambientales, dependerán de la concentración de metales pesados, contaminantes tóxicos y organismos patógenos. La persistencia de algunos metales y su ulterior magnificación con riesgos para la salud humana y medioambiental, imponen una activa vigilancia de todos los procesos de utilización y disposición final (EPA, 2000).

En la Norma 503 de la Agencia de Protección Ambiental, Estándares para la Aplicación y Disposición de Lodos de Aguas Residuales (*40 CFR Part 503 Rule: Standards for the Use and Disposal of Sewage Sludge*), se requiere que los sólidos de las aguas residuales sean procesados antes de ser aplicados o incorporados al terreno. Este proceso, denominado “estabilización”, ayuda a minimizar la generación de olores, destruir los agentes patógenos (organismos causantes de diversas enfermedades), y reducir las probabilidades de atracción de vectores. Existen diversos métodos para la estabilización de los sólidos de las aguas residuales como se muestra en la Tabla 1:

Tabla 1. Métodos para la estabilización de sólidos de las aguas residuales.

Estabilización Alcalina^a	Para el proceso de estabilización alcalina se utiliza cal viva (CaO) o cal hidratada (Ca[OH]₂) la cual es aplicada directamente sobre los biosólidos. La estabilización reduce los agentes patógenos y olores, además ayuda a neutralizar los suelos ácidos, por esta razón presenta restricciones en el uso de suelos con alto pH. La mezcla entre la cal y el biosólido se realiza en contenedores abiertos, donde la variación de la temperatura depende de condiciones tales como el tipo de mezclador, el almacenamiento y el tipo de cal utilizada (contenido de CaO y grado de hidratación). La EPA reglamenta que un tratamiento alcalino produce un biosólido clase A cuando mantiene el pH sobre 12 por 3 días, junto con una temperatura mayor de 52°C por 12h.
Digestión Anaerobia^b	El proceso de digestión anaerobia se realiza en un tanque cerrado para reducir la materia orgánica, el olor y el contenido de agentes patógenos presentes en los biosólidos. En este proceso, los microorganismos consumen una parte de la materia orgánica. Las bacterias anaerobias crecen en un ambiente libre de oxígeno convirtiendo esta materia en dióxido de carbono, metano (que puede ser recuperado y usado para energía), y amoníaco.

Digestión Aerobia^b	El proceso de digestión aerobia se realiza en un contenedor abierto o cerrado, usando bacterias aerobias que convierten la materia orgánica en dióxido de carbono, agua y nitrógeno. En este proceso se reducen los agentes patógenos y el olor.
Compostaje^b	El proceso de compostaje es la descomposición de materia orgánica por medio de microorganismos en un ambiente en cual se controla el tamaño y porosidad de las pilas, facilitando así, un incremento en la temperatura destruyendo los agentes patógenos. La humedad y los niveles de oxígeno ayudan a reducir la presencia de olores.
Secado Térmico^b	El secado térmico involucra el uso de secadores activos o pasivos para remover agua de los biosólidos (el secado solar es usado en algunos lugares). Esto garantiza la destrucción de agentes patógenos y reduce el volumen de los biosólidos.
Fuente: a. Araque, M. (2006). b. EPA (1999)	

La Norma 503 define dos tipos de biosólidos con respecto a la reducción de agentes patógenos, Clase A y Clase B, dependiendo del grado de tratamiento que los sólidos hayan recibido. En Colombia los parámetros que categorizan los biosólidos se encuentran en la Tabla 2.

Tabla 2. Parámetros para la categorización de los biosólidos.

Criterio de Calidad	Parámetro	Unidad de medida	Categoría Biosólido		
			A	B	C
Químicos -Metales Concentraciones máximas	Arsénico (As)	mg/Kg (Base Seca)	41	75	Corresponde a los biosólidos que no cumplen con algún (o) de los parámetros definidos para las categorías A ó B y que no son considerados como residuos peligrosos de acuerdo con la Normativa Ambiental Vigente
	Cadmio (Cd)		39	85	
	Cobre (Cu)		1500	4300	
	Mercurio (Hg)		17	57	
	Molibdeno (Mb)		75	75	
	Níquel (Ni)		420	420	
	Plomo (Pb)		300	840	
	Selenio (Se)		36	100	
	Zinc (Zn)		2800	7500	
Microbiológicos	Coliformes Totales	NMP/g de producto final (Base Seca)	< 1000	< 2 000 000	
	Huevos de Helmintos viables	Huevo Helminto viable / 4g de producto final (Base Seca)	< 1	-	
	Salmonella sp.	NMP / 4g de producto final (Base Seca)	< 3	-	

Fuente: Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2009.

Ambos tipos son adecuados para la aplicación al suelo, pero se imponen requisitos adicionales en la Clase B. Éstos se detallan en la Norma 503 e incluyen actividades tales como el acceso restringido del público al terreno de aplicación, la limitación de consumo por el ganado, y el control de los periodos de cosecha. Los biosólidos de la Clase A (biosólidos tratados de tal manera que no contengan agentes patógenos a niveles detectables) no están sujetos a estas restricciones (EPA, 2000).

En la PTAR-C las propiedades físico-químicas y microbiológicas del biosólido están establecidas por los parámetros de la Tabla 3.

Tabla 3. Caracterización inicial del biosólido PTAR-Cañaveral, Cali.

Características	Biosólido Húmedo*	Biosólido Seco**	Valores de Referencia
Fisicoquímicas			
pH	7,21	6,96	7.5
Humedad (%)	66,5	50,1	--
Materia orgánica (%)	29,58	25,88	--
Nitrógeno total (%)	2,42	2,25	1,6 - 3,0
Relación C/N	7,1	6,7	--
Fósforo total (mg/kg)	304,03	296,73	15.000 – 40.000 ^a
Potasio (meq/100g)	0,05	0,04	0 – 3,0
Sodio (meq/100g)	0,02	0,02	--
Calcio (meq/100g)	0,70	0,68	--
Magnesio (meq/100g)	0,06	0,07	--
CIC (meq/100g)	104,49	125,85	--
Hierro-Fe (mg/kg)	<1,00***	<1,00***	3,0-8,0 ^a
Cobre- Cu (mg/kg)	<0,10***	<0,10***	1500 ^b
Manganeso- Mn (mg/kg)	11,28	13,4	--
Zinc- Zn (mg/kg)	2,71	2,71	2800 ^b
Microbiológico y Parasitológico			
Coliformes fecales (UFC/g)	6.30 x10 ⁵	7.90 x 10 ⁵	Clase A: < 1X10 ³ ^b Clase B: < 2X10 ^{6b}
<i>Salmonella</i> sp.	Ausencia	Ausencia	< 3 NMP/4g
Huevos de Helmintos (HH/g)	5	5	Clase A: < 1HH/4 g ^b
* Procedente de digestión anaerobia y deshidratación en filtro prensa.			
** Biosólido húmedo sometido a deshidratación natural adicional, temperatura ambiente (25-31°C) por 72h.			
*** Límite de detección del método.			
a. Metcalf y Eddy (2003). b. EPA (2003).			

Fuente: Torres *et al.*, 2009.

3.2 EL SUELO

El suelo es un sistema abierto, dinámico, constituido por tres fases. La fase sólida está constituida por los componentes inorgánicos y orgánicos, que dejan un espacio de huecos (Poros, cámaras, galerías, grietas y otros) en el que se hayan las fases líquida y gaseosa. El volumen de poros está ocupado parcialmente por agua, como componente principal de la fase líquida, que puede llevar iones y sustancias en solución o en suspensión; por aire, que constituye la fase gaseosa o atmósfera del suelo y por las raíces y organismos que viven en el suelo (Porta, 1994).

3.2.1 Propiedades hidrodinámicas del suelo

El suelo puede dejar pasar agua a través de él dado que se trata de un medio poroso, como un sistema de poros interconectados. En campo, raramente se dan unas condiciones de equilibrio termodinámico en el sistema suelo-agua. El movimiento del agua en forma líquida, en muchos casos, puede explicarse como el resultado de diferencias de potencial hidráulico entre distintos puntos.

Los procesos implicados en el movimiento del agua son la entrada en el suelo (infiltración, entradas laterales o ascenso a partir de una capa freática), redistribución entre distintos puntos (transferencia y acumulación), absorción por parte de las plantas y la evaporación (Porta, 1994).

3.2.1.1 Infiltración

La infiltración es el movimiento del agua de la superficie hacia el interior del suelo, en este proceso el agua puede moverse en diferentes direcciones (verticalmente, horizontalmente y radialmente) (Tafur, 2008). En general se definen las siguientes fases:

- El intercambio: Ocurre en la superficie del suelo, donde se presenta evaporación debido al movimiento capilar o por medio de la transpiración de las plantas.
- La transmisión: Se presenta cuando la acción de la gravedad supera a la de la capilaridad y hace que el agua se deslice verticalmente hasta encontrar una capa impermeable.
- La circulación: Se presenta cuando el agua se acumula en el subsuelo debido a la acción de una capa impermeable y empieza a circular por la acción de la gravedad.

Según Jaramillo (2001), la velocidad con la cual pasa el agua del exterior al interior del suelo depende de varios factores como:

- El contenido de humedad que presente el suelo al momento de hacer la evaluación: A mayor contenido de humedad, menor será la velocidad de infiltración.
- La permeabilidad del suelo: La calidad del arreglo físico del suelo facilita o dificulta el movimiento de agua dentro de él, aumentando o disminuyendo, respectivamente, la velocidad con la cual el suelo puede recibir nuevas cantidades de agua.
- La cantidad y tipo de coloides: Si en el suelo hay contenidos considerables de coloides expansibles, a medida que el suelo se va humedeciendo se va reduciendo el tamaño de los poros, aumentando la fricción del agua en ellos y por tanto aumentando la dificultad para su movimiento, lo cual reduce, a su vez, la infiltración.
- El tipo de poros: Si en el suelo predominan los poros finos, la infiltración será baja; éste tipo de poros puede estar relacionado con texturas finas y/o poco desarrollo estructural, así como con problemas de compactación.
- La homogeneidad del perfil del suelo: En suelos de perfil homogéneo se presenta una alta continuidad en el espacio poroso, la cual facilita el movimiento del agua y su infiltración; cuando hay contrastes texturales y estructurales en el interior del suelo, éstos pueden generar interrupciones en los poros, o reducciones drásticas en el tamaño de ellos que desaceleran el flujo del agua y la infiltración.

- Las condiciones superficiales del suelo: La presencia de sellamiento y/o encostramiento superficial del suelo reduce su infiltración.
- La temperatura: influye en la velocidad de infiltración ya que afecta la viscosidad y también la tensión superficial.

A continuación se presenta la interpretación de esta variable.

Tabla 4. Interpretación de la velocidad de infiltración básica.

Clase	Velocidad de infiltración mm / h	Evaluación
1	< 1	Adecuado para cultivo de arroz. Con el fangueo se debe conseguir una capa impermeable con una infiltración inferior a 0,2 mm/ h. Riesgo de erosión elevado.
2	1 - 5	Lenta. Riesgo de erosión importante. Se pierde una parte considerable del agua de riego. Puede haber falta de aireación para las raíces en condiciones de exceso de humedad.
3	5 - 20	Moderadamente lenta. Óptima para riego de superficie.
4	20 - 60	Moderada. Adecuada para riego de superficie.
5	60 -125	Moderadamente rápida. Demasiado rápida para riego de superficie, provoca pérdidas de nutrientes por lavado. Baja eficiencia de riego.
6	125 -250	Rápida. Marginal para riego de superficie.
7	> 250	Muy rápida. Excesiva para riego de superficie. Característica de los Psamments, por ejemplo. Se requiere riego localizado.

Fuente: Landon, 1984.

3.2.1.2 Conductividad hidráulica

La conductividad hidráulica es el parámetro cuantificador del grado de permeabilidad que puede tener un suelo, en términos prácticos es la facilidad del suelo saturado para permitir el paso del agua (Jaramillo, 2007). En la Tabla 5, se muestra la interpretación de los valores de esta variable.

La relación entre el tamaño de los poros del suelo y la conductividad hidráulica es lineal, entre mayor sea el tamaño de poros, mayor es la conductividad, por lo cual es una propiedad que depende fuertemente de la estructura, la textura y la composición mineralógica de las arcillas (Jaramillo, 2001).

Tabla 5. Interpretación de los valores de conductividad hidráulica.

Conductividad hidráulica		
m /día	cm/ h	Interpretación
< 0,2	< 0,8	Muy lenta
0,2 -0,5	0,8 -2,0	Lenta
0,5 - 1,4	2,0 -6,0	Moderada
1,4 - 1,9	6,0 -8,0	Moderadamente rápida
1,9 - 3,0	8,0 - 12,5	Rápida
> 3,0	> 12,5	Muy rápida

Fuente: FAO, 1963.

- *Conductividad hidráulica en suelos no saturados*

En régimen no saturado el volumen de poros está solo parcialmente lleno de agua. Dado que el transporte de agua depende del rozamiento con las paredes de los huecos por los que circula, este rozamiento será tanto mayor cuanto mayor sea la superficie de contacto, por volumen de agua. La conductividad hidráulica deja de ser constante en régimen no saturado, pasa a depender del potencial matricial y será menor que en régimen saturado (Porta, 1994).

En la zona no saturada la conductividad hidráulica varía no solo de un suelo a otro, sino que para un mismo suelo es función del contenido de agua. La medida de la conductividad hidráulica no saturada resulta mucho más difícil de medir con precisión que la saturada, y no existe un método cuya validez sea general para todos los suelos y circunstancias (Porta, 1994).

- *Relación entre la tensión de humedad del suelo (THS), contenido de humedad y conductividad hidráulica*

La tensión de humedad del suelo mide la fuerza con la cual esta retenida el agua a las partículas del suelo. Cuando aumenta la tensión disminuye el espesor de la película de agua. Es más fácil extraer agua de películas gruesas de humedad, mientras se requiere una tensión mayor para extraer agua de películas delgadas. Existe una relación inversa entre la tensión y el contenido de humedad del suelo (curvas de retención). Cuanto mayor sea la tensión aplicada menor será el contenido de humedad retenida en el suelo (Fetter, 2001).

El contenido de humedad en el suelo se refiere a la cantidad de agua que se haya en cada posición de un suelo en un momento determinado. La relación entre el contenido en agua del suelo y la succión del agua del mismo es una parte fundamental de la caracterización de sus propiedades hidráulicas. El contenido de agua en el suelo influye fuertemente en las distintas propiedades de este, entre ellas la consistencia, plasticidad y compactación. Para un mismo contenido de humedad, en función del tipo de suelo de que se trate, el agua va a ser retenida con una energía u otra, debido a la existencia de una relación entre la humedad y el potencial mátrico. Dicha relación, depende de la textura y la estructura, dado que ambas propiedades afectan al tamaño y al número de poros (Martínez, 2008).

La conductividad hidráulica del suelo es fuertemente dependiente de su contenido de humedad y puede disminuir varios órdenes de magnitud al pasar del estado de saturación a punto de marchitez permanente. Por tanto, la conductividad hidráulica del suelo

depende principalmente de su estructura, del contenido de humedad del suelo y de la temperatura del agua (Jaramillo, 2001).

La conductividad disminuye cuando también lo hace el contenido de humedad, ya que la sección útil de los poros (agua en estado líquido) se ve reducida y la tortuosidad aumenta. Por otra parte, por ser los poros mayores los primeros en vaciarse, las moléculas de agua quedan más próximas a las superficies de las paredes de los poros y con ello se produce un incremento de la resistencia viscosa a la filtración. Por estas razones la conductividad hidráulica se considera como una función del contenido de agua del suelo y dos medios con la misma porosidad pueden mostrar distinta conductividad hidráulica (Fetter, 2001)

3.2.2 Propiedades Físicas del suelo

3.2.2.1 Textura

El tamaño de las partículas que predominan determina la textura del suelo; se dice que un suelo es de textura gruesa cuando las partículas predominantes son de tamaño grande (arenas); en cambio, los suelos de textura fina son aquellos cuyas partículas predominantes son las de menor tamaño (limos y arcillas); además, las distintas partículas difieren bastante en cuanto a sus propiedades físico-químicas, por lo cual, la naturaleza de los suelos minerales está determinada, en gran parte, por el grupo de separados que predominan en él. La textura del suelo tiene especial significado en: aireación, movimiento del agua, retención de humedad, retención y liberación de iones, disponibilidad de nutrientes y con ellos en su productividad, erodabilidad, uso y manejo (Jaramillo, 2001).

3.2.2.2 Estructura

Al considerar la estructura del suelo debe entenderse por partículas no solo las que forman los separados mecánicos, como arena, limo y arcilla, sino también los agregados o elementos estructurales que se han formado por agregación de fracciones mecánicas más pequeñas. La partícula designa, pues, toda unidad componente del suelo,

ya sea primaria (fracción de arena, limo o arcilla) o secundaria (agregado o tactoide). La estructura del suelo implica un arreglo u ordenación de esas partículas primarias y secundarias en ciertos modelos o patrones estructurales. Tales patrones incluyen necesariamente el espacio de poros acompañantes (Baver *et al.*, 1973).

3.2.2.3 Porosidad

La distribución del espacio poroso depende de la composición y arreglo de la fracción sólida, es decir, de la textura, del contenido de materia orgánica y de la estructura, definiéndose dos tipos de espacios porosos:

Microporosidad o Porosidad textural, está compuesta por el volumen de los poros más finos que tiene el suelo y que, en su mayor cantidad se encuentran en el interior de los peds.

Macroporosidad o Porosidad estructural, es el volumen de poros grandes del suelo, los cuales se encuentran, en mayor proporción, ubicados entre los peds.

La diferenciación anterior tiene su máxima importancia, cuando se considera la función específica de cada tipo de porosidad, ya que los macroporos son los responsables de la circulación del agua, sobretodo cuando está en exceso, y del aire en el suelo, en tanto que los microporos son los encargados de almacenar agua dentro del mismo. La proporción en que se encuentren los diferentes tamaños es la que controla las relaciones fundamentales entre las fases sólida - líquida - gaseosa, influyendo grandemente en cualidades edáficas como drenaje, infiltración, almacenamiento de agua, aireación, temperatura, entre otras (Jaramillo, 2001).

3.2.2.4 Densidad Aparente

Es la densidad del suelo que se calcula teniendo en cuenta el espacio ocupado por los poros al cuantificar el volumen de la muestra de suelo, razón por la cual depende de la organización que presente la fracción sólida del mismo y está afectada por su textura, su

estructura, su contenido de materia orgánica, su humedad (en especial en suelos con materiales expansivos) y su grado de compactación, principalmente (Jaramillo, 2001).

Los suelos desarrollan capas distintas a diversas profundidades bajo la superficie, estas secciones verticales de suelo reciben el nombre de perfil (Thompson, 2002). En el valle geográfico del río Cauca estos perfiles son desarrollados principalmente a partir de depósitos aluviales, compuestos principalmente de sedimentos arcillosos y de arenas calcáreas, existiendo también en los extremos sur y norte fuertes influencias de cenizas volcánicas (IGAC, 1990).

3.2.3 Materia orgánica

Si bien gran cantidad de las características que presenta un suelo vienen determinadas por el tamaño de las partículas minerales y por el área superficial que presentan, estas pueden ser modificadas por la MO de las siguientes formas(Narro, 1994):

- Favoreciendo la formación de agregados y de estructura del suelo, debido a su acción cementante, incrementando la agregación de partículas sólidas y mejorando la estabilidad estructural. Todo ello ocasiona una reducción de la densidad aparente, un incremento de la porosidad total del suelo y de la aireación, facilitando la penetración de aire y agua, también incrementando la humedad disponible para las plantas y mejorando el uso del agua, modificando la velocidad de infiltración y la conductividad hidráulica, aumentando la facilidad de laboreo y disminuyendo la conductividad térmica del suelo haciéndolo más resistente a los cambios bruscos de temperatura.
- Produciendo cambios en la superficie del suelo, tales como: oscurecimiento del color, amortiguamiento del impacto de las gotas de lluvia y del viento; aumentando la resistencia a la erosión, reduciendo o evitando la formación de costras, reduciendo las pérdidas de agua por evaporación empleándose como “acolchado” y favoreciendo el almacenaje de agua aprovechable y el humedecimiento del perfil del suelo a mayor profundidad.

- Mejorando la fertilidad natural del suelo a través de diversos tipos de acción: como fuente de nutrientes para plantas, microorganismos y otros seres vivos del suelo, liberando nutrientes durante su descomposición y produciendo ácidos orgánicos capaces de disolver minerales poniéndolos en forma aprovechable por las plantas, aumentando la capacidad de intercambio catiónico del suelo, elevando la capacidad amortiguadora de cambios en el pH y formando compuestos orgánico-minerales que favorecen la absorción de nutrientes por las plantas.

3.3 CULTIVO DE CAÑA DE AZÚCAR (*Saccharum Officinarum*)

La caña de azúcar se puede desarrollar en forma satisfactoria en una gran variedad de condiciones edáficas, pero se desarrolla mejor en suelos francos o francos –arcillosos, bien drenados y profundos, con pH entre 5.5 y 6.5. Suelos con valores de pH inferiores a 5.5 pueden limitar la producción por la presencia de niveles altos de aluminio (Al) intercambiable y micronutrientes como hierro (Fe), y manganeso (Mn) que pueden producir fitotoxicidad a la planta. En suelos con valores de pH mayores que 8 se presentan niveles altos de sodio (Na) intercambiable que pueden causar toxicidad a las plantas e inducir cambios en las condiciones físicas del suelo, reduciendo la porosidad lo que resulta en drenajes muy pobres y en una conductividad hidráulica muy lenta (CENICAÑA, 2002).

En la zona azucarera del valle geográfico del río Cauca, los requerimientos totales de agua de la caña de azúcar, desde la siembra hasta la cosecha a los 13 meses, en general varían entre 843 y 1354 mm. Por lo tanto, en zonas con precipitación anual baja y con distribución irregular, es necesario aplicar riegos suplementarios (Quintero, 1995).

Con respecto a los requerimientos nutricionales de la caña de azúcar, existen 16 elementos nutritivos esenciales para el cultivo: el carbono, el hidrogeno y el oxigeno no son minerales y la planta los toma del bióxido de carbono y del agua. Los nutrimentos restantes son: N, P, K, Ca, Mg, S. Los micronutrientes son: B, Zn, Cl, Cu, Fe, Mn, Mo; estos últimos aunque son necesarios para el normal desarrollo de la planta, se requieren en cantidades muy pequeñas (Quintero, 1995).

3.3.1 Desarrollo general del cultivo

El desarrollo inicial de la caña de azúcar está influenciado por varios factores inherentes a la semilla como la edad, la variedad y la localización de las yemas en el tallo; y factores de manejo como la calidad de la labranza, la humedad del suelo, la profundidad de siembra y de surco, la localización de la semilla en la siembra y el tiempo entre el corte y la siembra (Rodríguez y Mendes, 1997).

Durante los primeros cuatro meses de edad la caña utiliza la mayoría de las reservas de sacarosa en la emisión de tallos. En esta etapa, que se conoce como macollamiento del cultivo, los tallos tienen un crecimiento muy lento (entre 1.5 cm y 2.0 cm por semana).

Entre los cuatro y los diez meses de edad las reservas de sacarosa son utilizadas para satisfacer el crecimiento de los tallos, por lo cual ésta se define como la etapa de rápido crecimiento. Durante esta etapa, en el valle del río Cauca los tallos de caña de azúcar pueden crecer aproximadamente entre los 8 cm y 10 cm por semana según la variedad (genotipo), el suelo, el clima y las prácticas de cultivo. Hasta ese momento, la planta no ha tenido la oportunidad de almacenar grandes cantidades de sacarosa en los tallos, razón fundamental por la cual la caña de azúcar no se cosecha antes de los diez meses de edad (Villegas, 2010).

Después de los diez meses de edad, la caña disminuye de forma natural su ritmo de crecimiento y en condiciones normales, los tallos pueden crecer alrededor de 6 cm cada semana. En ese momento los tallos empiezan a almacenar un excedente de sacarosa y es cuando se inicia el proceso de maduración de la caña de azúcar (Villegas, 2010).

3.3.2 Variedad CC 85-92

Uno de los componentes básicos en la producción de caña de azúcar son las variedades. Cada vez se requieren mejores variedades en términos de productividad y rentabilidad.

El Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia (CENICAÑA) inició en 1980 el programa de cruzamientos y a partir de 1981 el proceso de selección de variedades. En 1985 fue seleccionado el clon CENICAÑA COLOMBIA (CC) 85-92 que a partir de 1999

pasó a ser la primera variedad comercial en área sembrada por la industria azucarera de Colombia en el valle del río Cauca.

En el año 2001 se cosecharon 53.600 hectáreas con edad promedio de 12.2 meses. En relación con el promedio general de las demás variedades cosechadas, en 2001 la variedad CC 85 -92 tuvo un rendimiento (%) superior en 0.27 unidades, 16.27 toneladas de caña por hectárea (TCH) más y 2.3 toneladas de azúcar por hectárea (TAH) adicionales.

Actualmente, la variedad CC 85-92 se encuentra sembrada en 82.500 hectáreas, equivalentes al 40% del área total sembrada en la zona azucarera (CENICAÑA, 2002).

3.3.3 Morfología

La variedad CC 85-92 tiene un crecimiento ligeramente inclinado o decumbente, presentando un alto macollamiento. El tallo tiene entrenudos de coloración morada cuando están expuestos al sol, y morada-amarilla cuando aún no han recibido luz solar. Los entrenudos, a la altura del tercio medio del tallo, miden en promedio 12 cm, con un rango entre 9 y 15 cm y tienen un diámetro promedio de 32 mm, con un rango entre 28 y 36 mm. Su forma es coneiforme con una ligera disposición en zigzag, su textura es lisa, con ausencia de yema y escasa presencia de cera. La yema tiene forma ovalada y no sobrepasa el anillo de crecimiento.

La hoja tiene ápice curvo y el promedio del ancho de la lámina foliar, medido en la parte media de la hoja, es de 7 cm, con valores entre 6 y 8 cm. La copa foliar presenta un volumen denso y su tonalidad es verde-oscuro. La lígula es creciente. Las aurículas son lanceoladas y su distribución es asimétrica. El cuello tiene forma normal y su color es verde. La yagua o vaina presenta una escasa pubescencia dorsal. El cogollo es de color verde-oscuro y el promedio de su longitud, medido desde la yagua completamente adherida al entrenudo y la hoja con la primera lígula visible es de 80 cm. Es una variedad de fácil deshoje (CENICAÑA, 2002).

La tasa de germinación y el desarrollo la variedad CC 85-92 presenta una ligera desventaja frente a otras variedades comerciales, aunque su crecimiento posterior y el

desarrollo de los tallos es mayor. La capacidad de esta variedad para competir con las malezas es favorable debido a su rápido desarrollo, follaje frondoso y buen macollamiento(Ranjel *et al.*, 2003).Con respecto al suministro de agua Amaya *et al.*, (1995) reportan que el déficit de agua durante el período de macollamiento reduce el número de tallos; sin embargo, si el déficit no es severo, este efecto, generalmente, desaparece una vez se regula el suministro de agua.

3.3.4 Clima y temperatura

La caña de azúcar se adapta a un amplio rango de condiciones climáticas; pero se desarrollan mejor en regiones tropicales cálidas con amplia radiación solar. La temperatura óptima para el desarrollo de la caña de azúcar oscila entre 25 y 28 °C. Las altas temperaturas, conjuntamente con altas humedades en el suelo y en el aire, favorecen el desarrollo vegetativo, mientras que el ambiente seco y caliente promueve la maduración de la planta. Con respecto a los requerimientos hídricos totalesde agua de la caña de azúcar, desde la siembra hasta la cosecha a los 13 meses, varían entre 843 y 1354 mm(Quintero 1995).

En general, el valle del río Cauca presenta un régimen bimodal de precipitación atmosférica, según Barrios y Cortés(2010), el régimen bimodal consiste en la sucesión intercalada de dos temporadas lluviosas (abril – mayo y octubre - noviembre) y dos temporadas secas (enero – febrero y julio - agosto), separadas una de la otra por cuatro periodos de transición entre temporadas, con lluvias inferiores a los 1800mm anuales.

4. OBJETIVOS

4.1 OBJETIVO GENERAL

Analizar el efecto sobre algunas propiedades hidrodinámicas del suelo y agronómicas de un cultivo de caña bajo la aplicación de biosólidos con tratamiento alcalino provenientes de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Cañaveralejo (PTAR –C).

4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Evaluar el comportamiento de la conductividad hidráulica e infiltración del suelo de un cultivo de caña antes y después de la aplicación de biosólidos con tratamiento alcalino.
- Evaluar a lo largo del tiempo el desarrollo de la altura, distancia entre nodos y grosor del tallo de un cultivo de caña de azúcar bajo la aplicación de biosólidos con tratamiento alcalino.

5. METODOLOGÍA

5.1 DISEÑO EXPERIMENTAL

5.1.1 Localización

La investigación se desarrolló en una parcela dentro de las instalaciones de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Cañaveralejo (PTAR-C), que se encuentra ubicada en la ciudad de Santiago de Cali, entre las comunas 6 y 7 (Figura 1). El terreno en el cual se realizó la siembra de la caña de azúcar es plano, con una pendiente menor al 1% y un área aproximada de 0.98 ha, con coordenadas geográficas $3^{\circ}28' 17''\text{N}$, $76^{\circ}28'52.8''\text{W}$ y a 967 m.s.n.m. Con respecto a las variables climáticas se presentan temperaturas (min 22.3°C y max 32.8°C), humedad relativa (min 39% y max 82%), precipitaciones de 122.69 mm/mes y evaporación de 137.8 mm/mes (www.cenicaña.org).



Figura 1. Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR-C).Fuente: EMCALI, 2000

5.1.2 Tratamientos Implementados

El diseño experimental se constituyó inicialmente con tres bloques, cada uno con tres tratamientos denominados: T1, T2, y T3 (5 m de ancho por 20 m de largo), los cuales se distribuyeron al azar. Cada tratamiento constó de 3 surcos para un total de 27 surcos. Por cuestiones en la parte logística de la PTAR durante la fase inicial del experimento, se perdió el bloque 3, por lo cual se trabajó el resto de la fase experimental con dos bloques.

El factor de bloqueo se determinó con base al aporte de nutrientes por parte del biosólido, en especial a la dosis de nitrógeno requerido para el normal desarrollo del cultivo.

Para evitar el efecto de borde los tratamientos se separaron entre sí a una distancia de 2 m (en el mismo bloque) y a una distancia de 5 m (entre bloques) (Ver Figura 2 y 3). Los tratamientos se conformaron como se presenta en la Tabla 6.

Tabla 6. Descripción de los tratamientos implementados.

Tratamiento 1	Este tratamiento no se sometió a ningún tipo de biosólido, por lo que actuó como testigo y ayudó al final en la comparación de las variables.
Tratamiento 2	Este constó de una aplicación de biosólido con tratamiento alcalino representando una aplicación al 100% de la dosis de requerimiento de nitrógeno.
Tratamiento 3	Este constó de una aplicación de biosólido con tratamiento alcalino representando una aplicación al 200% de la dosis de requerimiento de nitrógeno.

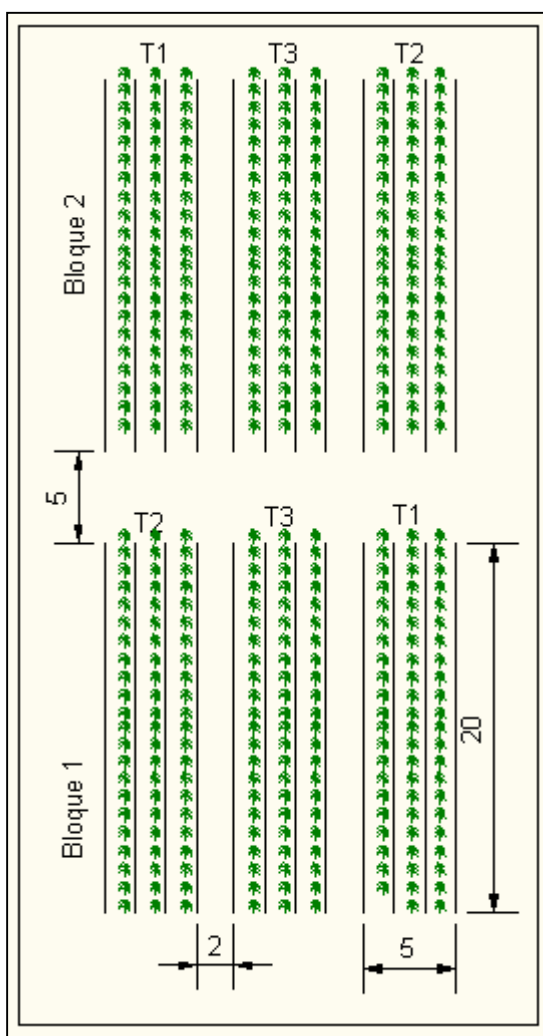


Figura 2. Disposición de los tratamientos implementados. (Vista Superior, unidades en m).



Figura 3. Distribución de los bloques en el campo.

5.1.3 Tipos de Variables

Las variables que se estudiaron en este proyecto fueron:

- **Variable Independiente:** Es la variable que se modificó en el experimento, en este caso, la dosis de biosólido.
- **Variables Dependientes o de respuesta:** Estas están sujetas a la variable independiente. Las variables medidas en el suelo fueron: infiltración y conductividad hidráulica y en la planta: distancia entre nodos, grosor del tallo y altura.
- **Variables Constantes o explicadoras:** Entre las cuales se trabajaron: tipo de suelo, cantidad de agua para el riego y temperatura.

5.2 PROCEDIMIENTO Y REGISTRO DE DATOS

5.2.1 Preparación del terreno, aplicación del biosólido y control.

Inicialmente se realizaron labores primarias y secundarias de labranza mecanizada, arado y rastra, respectivamente. Después la preparación del terreno se continuó a cabo en el

siguiente orden: cincelado, arado, rastrillado I, nivelado, rastrillado II y surcado. Con esto se garantizó que el terreno fuera apto para la siembra (Ver Figura 4).



Figura 4. Labores de preparación del terreno para la siembra del cultivo.

Posterior a estas labores se prosiguió con la incorporación de los biosólidos de forma manual en los surcos de acuerdo a la tasa agronómica establecida por la EPA 1993:

$$Tasa\ agronómica \left(\frac{Ton}{ha} \right) = \frac{Cantidad\ de\ N\ que\ necesita\ el\ cultivo}{N\ disponible\ en\ los\ biosólidos}$$

El propósito de limitar la tasa de aplicación a la tasa agronómica, es reducir al mínimo la contaminación del agua subterránea en el sitio de aplicación, por el nitrógeno contenido en los biosólidos (EPA, 1993). Para el área efectiva de cada tratamiento la tasa y dosis de aplicación del biosólido presentó como resultado 23.8 ton/ha para el T2 (Dosis 100%) y 47.6 ton/ha para el T3 (Dosis 200%). En la Figura 5, se observa la incorporación de los biosólidos en campo.



Figura 5. Incorporación de los biosólidos en campo.

Se continuó con la siembra para la cual se utilizó semilla de la caña de azúcar de la variedad CC 85-92 con una longitud de 60 cm. Se utilizó esta variedad, ya que es la más sembrada por la industria azucarera de Colombia en el valle del Río Cauca.

La siembra se realizó de forma manual el día 28 de Octubre de 2010, depositando las semillas en el fondo del surco, distribuyéndolas uniformemente, asegurando el traslape, posterior a ello se cubrieron con una capa de suelo (Ver Figura 6).



Figura 6. Siembra de la semilla en campo.

Para las labores de riego se utilizó el método de gravedad por surcos, cuya distribución se realizó portubería de ventanas y conducción cerrada (Ver Figura 7). El agua se extrajode un pozo profundo cercano a la parcela. La programación de riego se obtuvo a partir del estudio del balance hídrico diario, con los datos registrados en la estación meteorológica

PTAR-C, conjunta con la profundidad efectiva radicular del cultivo, 60 cm antes de los 4 meses de edad del cultivo y de 80 cm para los 4 a 10 meses de edad del cultivo. La aplicación del riego se realizó en el mes 0 (siembra), mes 5 y el mes 8.



Figura 7. Sistema de riego implementado.

Para el control de malezas se realizó una limpieza manual de forma mensual hasta los 8 meses, para los meses 6, 9 y 12 se realizó poda mecánica con guadaña. En los meses 2 y 4 se aplicaron herbicidas (glifosato) mediante bomba de espalda(Ver Figura 8).



Figura 8. Control de malezas en el campo.

5.2.2 Obtención y registro de las variables.

Se evaluaron después de la preparación del terreno las propiedades hidrodinámicas del suelo. Después de esta evaluación inicial, las pruebas de conductividad hidráulica e infiltración se realizaron en la parte media del surco central de cada tratamiento (acorde a los métodos y cronogramas indicados en la Tabla 7.). Para la conductividad hidráulica se realizaron dos pruebas y para la infiltración solo una, esto debido a la envergadura del proyecto.

Tabla 7. Propiedades hidrodinámicas, determinación del método para su evaluación y cronograma de pruebas.

Propiedades Hidrodinámicas	Método	Tiempo (meses después de la siembra)
Infiltración	Anillos Infiltrómetros	4, 10, 12
Conductividad Hidráulica	Pozo invertido	4, 10, 12

Se escogieron estos tiempos puesto que son los meses más representativos del desarrollo del cultivo de caña de azúcar (Amaya *et al.*, 1995).

Con respecto a las propiedades agronómicas de la planta como el grosor del tallo, esta se determinó de la parte media de la planta; la distancia entre nodos se tomó del tercio superior de la planta; la altura se midió desde el suelo hasta la última lígula visible. Este procedimiento se realizó a partir del cuarto mes escogiendo cinco plantas al azar por cada surco, teniendo en cuenta que estas plantas fueran representativas, el procedimiento se llevó a cabo de forma mensual hasta el mes 11.

5.3 ANÁLISIS DE DATOS

Los datos obtenidos de la investigación se analizaron por medio de estadística descriptiva y se analizó la varianza por el método ANOVA. Se comparó los intervalos de confianza y las medias (Tukey), para determinar posibles diferencias significativas entre los tratamientos. El análisis de los datos obtenidos se realizó con ayuda del software estadístico R 2.15.0.

En el Diseño de Bloques Completos al Azar (DBCA) se consideran tres fuentes de variabilidad: el factor de tratamientos, el factor bloque y el error aleatorio. El modelo estadístico para este diseño está dado por:

5.3.1 Modelo matemático para las propiedades hidrodinámicas del suelo

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + \gamma_j + \varepsilon_{ij}$$

Y_{ij} = Es la medición correspondiente al tratamiento i y el bloque j .

μ = Media global poblacional.

τ_i =Es el efecto debido al tratamiento i .

γ_j =Es el efecto debido al bloque j .

ε_{ij} = Es el error aleatorio atribuible a la medición Y_{ij} .

En este caso el valor i oscila entre 1 y k , el número total, y el valor j oscila entre 1 y b , siendo b el número total de bloques. (Gutiérrez y De la Vara, 2003)

5.3.2 Modelo matemático para las propiedades agronómicas del cultivo

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + \gamma_j + \varepsilon_{ij} + \sigma_{ij}$$

Y_{ij} = Es la medición correspondiente al tratamiento i y el bloque j.

μ = Media global poblacional.

τ_i =Es el efecto debido al tratamiento i.

γ_j =Es el efecto debido al bloque j.

ε_{ij} = Es el error aleatorio atribuible a la medición Y_{ij} .

σ_{ij} = Es el error de componente de submuestreo.

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1 CARACTERIZACIÓN INICIAL DEL SUELO Y DEL AGUA DE RIEGO

6.1.1 Caracterización del suelo

El suelo perteneciente al lote en estudio es un Inceptisol (*Vertic Endoaquepts*) con características vérticas, lo que indica dominancia de la fracción arcillosa en todos sus horizontes. En términos de cartografía el lote pertenece a la consoniación Juanchito JN, un suelo representativo en el Valle del Cauca (IGAC, 1990), con un clima correspondiente a un piso térmico moderado, con altitudes de 900 a 1000 metros. Este suelo se ha desarrollado a partir de materiales aluviales finos, en relieve plano-cóncavo, con pendientes no mayores de 3%, sin evidencias de erosión y de drenaje natural pobre a muy pobre (Externo (lento); Interno (lento); Natural (Mal drenado)).

Según el trabajo realizado por Herrera y Verdugo (2011), para el suelo en estudio se determinaron cuatro horizontes, con agregados bien formados y diferenciados, con una profundidad efectiva de 80 cm (moderadamente profundo), (Ver Tabla8).

Tabla 8. Caracterización física del suelo en estudio.

Horizonte	Profundidad (cm)	Color		Presencia de raíces	Presencia de Macro organismos	Estructura		Textura
		Perfil	Moteado			Tipo (Forma)	Grado	
A	0-21	2.5 Y 3/1 Gris Oscuro	Sin presencia	Abundante	Moderada	Blocosa Sub angular	Moderada	ArL
B1	21-48	10 YR 3/2 Café Grisáceo muy Oscuro	Sin presencia	Moderada	Poca	Blocosa Angular	Moderada	ArL
B2	48-70	2.5 Y 4/3 Pardo Oscuro	2.5 YR 4/8 Rojo	Moderada	Nula	Blocosa Sub angular	Fuerte	ArA
BC	70-110	10 YR 4/2 Pardo Grisáceo Oscuro	10 YR 4/2 Pardo Grisáceo Oscuro	Poca	Nula	Sin Estructura	Sin estructura	ArL

Fuente: Herrera y Verdugo, 2011.

En la Tabla 9 observamos valores de algunas propiedades físicas (Da, macro y microporosidad), obtenidas del trabajo realizado por Peñarete, 2012 para el suelo en estudio.

Tabla 9. Da (Mg/m³), macro y micro porosidad (%) para los tratamientos en el periodo de estudio.

Tratamiento	Mes 0			Mes 4			Mes 10			Mes 12		
	Da	macro	Micro	Da	macro	micro	Da	macro	micro	Da	macro	micro
T1	1,33	6,88	41,91	1,24	3,03	51,21	1,26	6,52	59,72	1,31	5,02	48,34
T2	1,33	6,88	41,91	1,32	5,38	47,16	1,31	4,80	47,44	1,36	6,51	45,89
T3	1,33	6,88	41,91	1,39	4,94	45,36	1,30	6,09	46,77	1,39	4,61	45,79

Fuente: Peñarete, 2012.

Los valores de microporosidad predominan en todos los tratamientos para los periodos de estudio evaluados, lo cual es indicador de posibles problemas de drenaje y aireación, aumentando la posibilidad de compactación del suelo, con respecto a la Da, según Cortés y Malagón (1984) para estos suelos de texturas finas los valores presentados se consideran altos ($> 1.3 \text{ Mg/m}^3$) (Jaramillo, 2001).

A continuación se presenta la caracterización química inicial del suelo en estudio y la clasificación de los valores presentados.

Tabla 10. Caracterización química del suelo en estudio.

Parámetro	Suelo	Clasificación
pH (unidades)	8.01	Básico ^a
C-Orgánico(g/kg)	11.63	
N-Total Kjendahl (mg/kg)	-	-
N-NH ₄ (mg/kg)	8.1	-
N-NO ₂ (mg/kg)	1.7	-
N-NO ₃ (mg/kg)	4.4	-
P-Total (mg/kg)	7.6	Medio ^b
K (cmol/kg)	0.51	Alto ^b
Ca (cmol/kg)	10.85	Alto ^c
Mg (cmol/kg)	4.53	Alto ^c
Na (cmol/kg)	0.43	Medio ^c
MO (%)	2.0	Medio ^b
CIC (cmol/kg)	16.32	Alta ^c
PSI (%)	2.63	Normal ^d
a. Porta, 1994. b. Quintero, 1993. c.INIA, 2003.d. Jaramillo, 2007.		

Fuente: Silva *et al.*, 2012.

Conbase en lo descrito en la Tabla10el suelo en estudio se define como básico con un contenido de M.O medio, valores comunes en los suelos de Valle del Cauca (según Jaramillo, 2001 y Quintero, 1993). Este tipo de suelo se presenta en áreas bajas, con relieves plano-cóncavos, tienen drenaje restringido y, por lo tanto, no son sometidas a procesos de lavado de sus bases; por el contrario, pueden incluso sufrir aporte de ellas por el nivel freático (Jaramillo, 2001).

El valor de PSI, se encuentra dentro de un rango normal (según Jaramillo, 2007), lo cual impide clasificarlo como sódico. En relación a la CIC, esta se considera alta, sin embargo, las bases de intercambio se encuentran con una variabilidad de sus límites relativos, como se observa en la Tabla 11.

Tabla 11. Porcentaje de saturación en el complejo de cambio.

Base intercambiable	Valor de referencia	Valor encontrado
Ca	60-80% de la CIC	66,48%
Mg	10-20% de la CIC	27,75%
K	2 - 6% de la CIC	3,13%
Na	0 - 3% de la CIC	2,63%

Fuente: INIA, 2003.

Esta distribución de las bases intercambiables conlleva a una inestabilidad a lo largo del perfil, que se manifiesta en la relación Ca/Mg y K/Mg que se encuentran por debajo de los valores óptimos (2.39 (< 5) y 0.11 (0.2 – 0.3) respectivamente (INIA, 2003)). De estos valores se evidencia una alta concentración del ion Mg^{+2} .

En las planicies del Valle del Cauca existen 116.872 ha con dominio del ion Mg^{+2} en el complejo de cambio, especialmente asociadas con Vertisoles, lo que ocasiona un marcado efecto sobre las propiedades físicas del suelo, como altos porcentajes de arcilla (> 30%), alta plasticidad, inestabilidad, con estructura débil o sin estructura (masivos), desarrollando grietas con la pérdida de humedad, y en algunos casos presentándose flujo preferencial (Torrente *et al.*, 2003).

Según Doerr *et al.*, (2000), el flujo preferencial es el movimiento concentrado del agua por una vía preferencial, a través de la matriz del suelo. Las vías de flujo preferencial son caminos que permiten la concentración del flujo y el movimiento del agua. Este movimiento se da a través de grietas, canales o agujeros que son más grandes de lo que cabe esperar por la distribución de tamaño de partículas del suelo. Su origen se radica en diversos factores:

- Agrietamiento de arcillas expansivas debido a procesos de humedecimiento y secamiento.
- Mediante la manipulación del suelo, sobre todo por efecto de su mecanización, puede generar vías de flujo preferencial
- Frentes inestables de humedecimiento.
- Presencia de materiales repelentes al agua.
- Presencia de aire atrapado y comprimido por delante de un frente de humedecimiento.
- Presión de entrada de aire más negativa que el potencial de humedad del frente de humedecimiento.

6.1.2 Caracterización del agua de riego

En cuanto a la caracterización química del agua de riego, esta se presenta en la Tabla 12.

Tabla 12. Caracterización química del agua de riego.

Parámetro	Pozo	Norma (FAO 1985)
pH (sin unidades)	7.2	6 – 8.5
CE (dS/m)	0.375	0 – 3
Cationes		
Calcio (Meq/lit)	0.99	0 – 20
Magnesio (Meq/lit)	0.76	0 – 5
Sodio (Meq/lit)	2.78	0 – 40
Aniones		
Sulfatos SO ₄ (Meq/lit)	0.006	0 – 20
Carbonatos CO ₃ (mg/lit)	0	0 – 1
Bicarbonatos HCO ₃ (Meq/lit)	0.15	0 -10

Fuente:Resultados solicitud de análisis CIAT (ANEXO F)

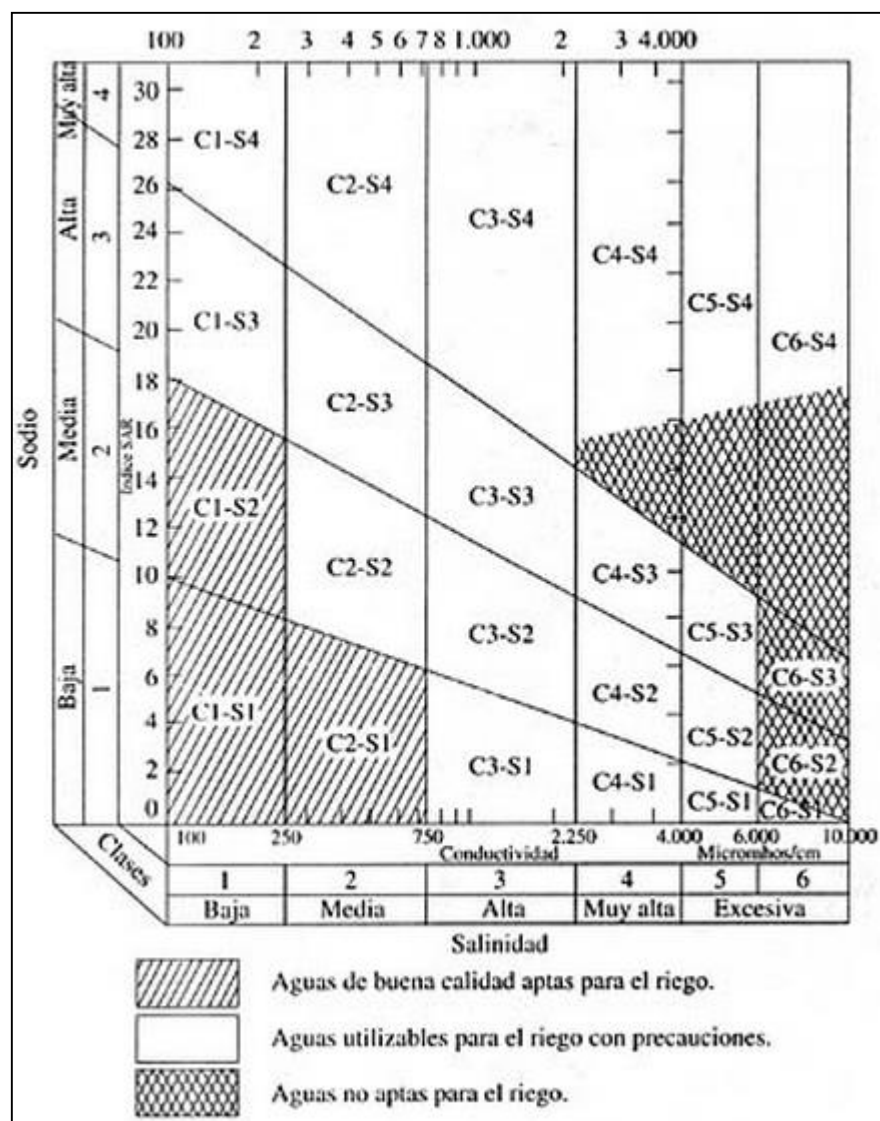


Figura 9. Normas Riverside: Diagrama para clasificar las aguas de riego según el U.S. Salinity Laboratory Staff (1954). Fuente: Urbano, 1995.

Según los valores dados en la Tabla 12 para los parámetros de conductividad eléctrica y sodicidad, relacionados con la Figura 9, se establece que el agua de riego utilizada en el presente estudio no genera riesgo para el cultivo (clasificación C2-S1).

6.2 CARACTERIZACIÓN DEL BIOSÓLIDO CON TRATAMIENTO ALCALINO

El biosólido aplicado en la investigación se obtuvo de la PTAR-C la cual trata 6.32 m³/s de aguas residuales bajo la modalidad de Tratamiento Primario Avanzado – TPA; el lodo se espesa, se digiere anaeróbicamente y se deshidrata en filtro prensa, produciendo aproximadamente 100t/día de biosólidos con 65% a 70% de humedad (Torres *et al.*, 2009).

La estabilización alcalina del biosólido utilizando cal hidratada permitió elevar rápidamente el pH a 12 unidades (valor inhibitor para los microorganismos patógenos) y mantenerlo por un periodo mayor a 72 horas, tiempo que garantiza una adecuada reducción de patógenos según la EPA 503 (EMCALI, 2007). En la Tabla 13 se observan los valores presentados para el biosólido utilizado, con sus respectivos valores de referencia.

Tabla 13. Caracterización química del biosólido producido en la PTAR-C con tratamiento alcalino.

Parámetro	Biosólido alcalinizado.
pH (unidades)	12.0
C-Orgánico (g/kg)	218.2
N-Total Kjendahl (mg/kg)	17970
N-NH ₄ (mg/kg)	0.013
N-NO ₂ (mg/kg)	0
N-NO ₃ (mg/kg)	34.5
P-Total (mg/kg)	9.7
K (mg/kg)	720
Ca (mg/kg)	137
Mg (g/kg)	5.19
Na (cmol/kg)	-
Tasa aplicada (t/ha)	23.8
Tasa de mineralización %	23

Fuente: Silva *et al.*, 2012.

La relación C/N se encuentra dentro del rango para los biosólidos de plantas de tratamiento de aguas residuales (ADEME, 2002) y no presentan restricción desde el punto de vista físicoquímico y de contenido de metales pesados como hierro, cobre, manganeso y zinc, según la guía para control de patógenos y vectores en lodos y biosólidos de la EPA; por la calidad microbiológica se clasifican como clase A (Torres *et al.*, 2009).

6.3 PROPIEDADES HIDRODINÁMICAS DEL SUELO

6.3.1 Infiltración

A continuación se presenta un resumen de la infiltración básica, calculada a partir de los datos obtenidos para los distintos tratamientos en sus respectivos bloques de acuerdo a los periodos de estudio establecidos. Para el muestreo inicial se tomaron dos puntos de que correspondían a la ubicación del bloque 1 y 2, estos muestreos se efectuaron antes de la aplicación de los tratamientos. El cálculo de la infiltración básica se tuvo en cuenta de acuerdo a las ecuaciones de Kostiakov- Lewis (Anexo A).

Tabla 14. Infiltración básica para los periodos de estudio establecidos.

	Tratamiento	Mes			
		0	4	10	12
Promedio (cm/hr)	T1	8,56	29,28	17,93	9,24
	T2		10,35	2,17	21,36
	T3		23,44	10,97	1,17
Desviación Estándar	T1	5,83	33,69	1,31	0,58
	T2		9,15	0,27	28,69
	T3		27,64	10,95	0,15
Coefficiente de Variación (%)	T1	68,06	115,04	7,30	6,29
	T2		88,41	12,38	134,34
	T3		117,90	99,78	12,75

De forma general se presentó una disminución para los T1 y T3, para el T2 inicialmente se presenta este comportamiento exceptuando el mes 12 para el cual se evidencia un aumento de este valor (Ver Figura 10-12), aunque no por encima de los otros tratamientos, correlacionado los valores de D_a y microporosidad (Ver Tabla 9) se observa que estos son altos, según Martínez (2008) indica que el suelo es compacto o poco poroso, que tiene mala aireación, y como resultado la infiltración del agua es lenta, esto se evidencia en los resultados obtenidos.

Los coeficientes de variación para la variable de infiltración se encuentran con valores inferiores al 10% y superiores al 100% para los periodos de estudio establecidos (Ver Tabla 14) indicando una alta variabilidad en las condiciones del suelo, cabe destacar que esta variabilidad está afectada tanto por las propiedades vérticas presentes como el aporte de calcio por parte del biosólido, según Bronik y Lal, (2005) la precipitación del carbonato de calcio produce cementación en los poros.

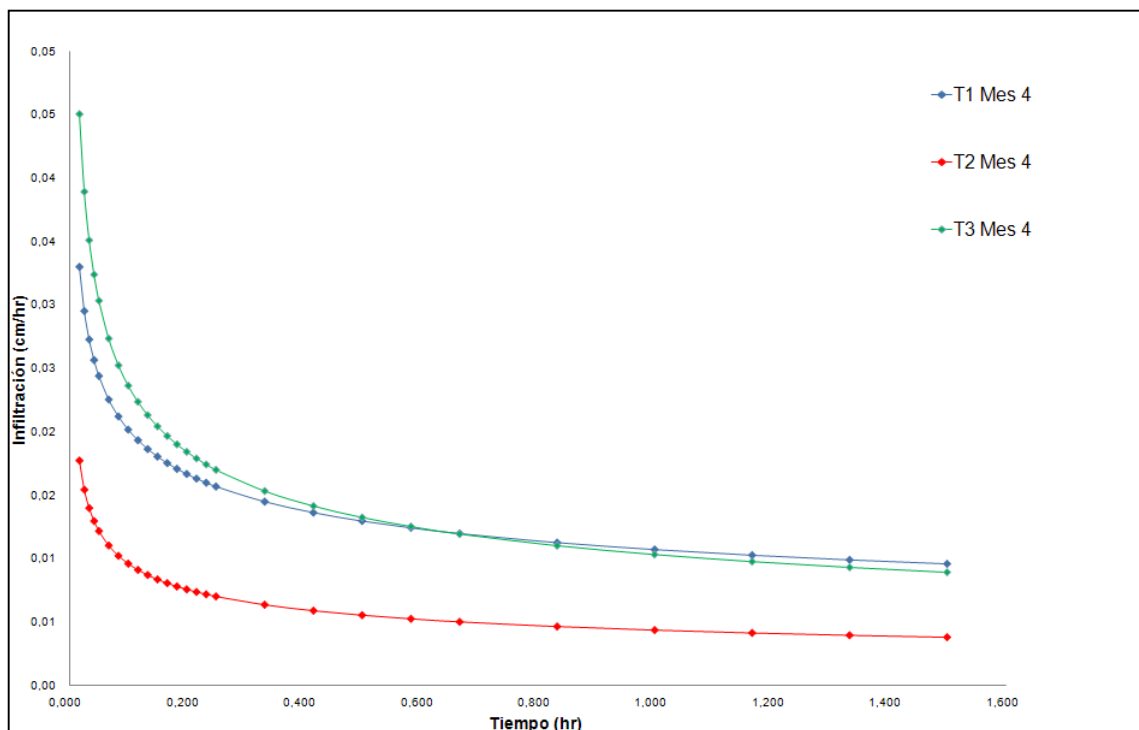


Figura 10. Curvas de infiltración básica para los tratamientos evaluados en el mes 4.

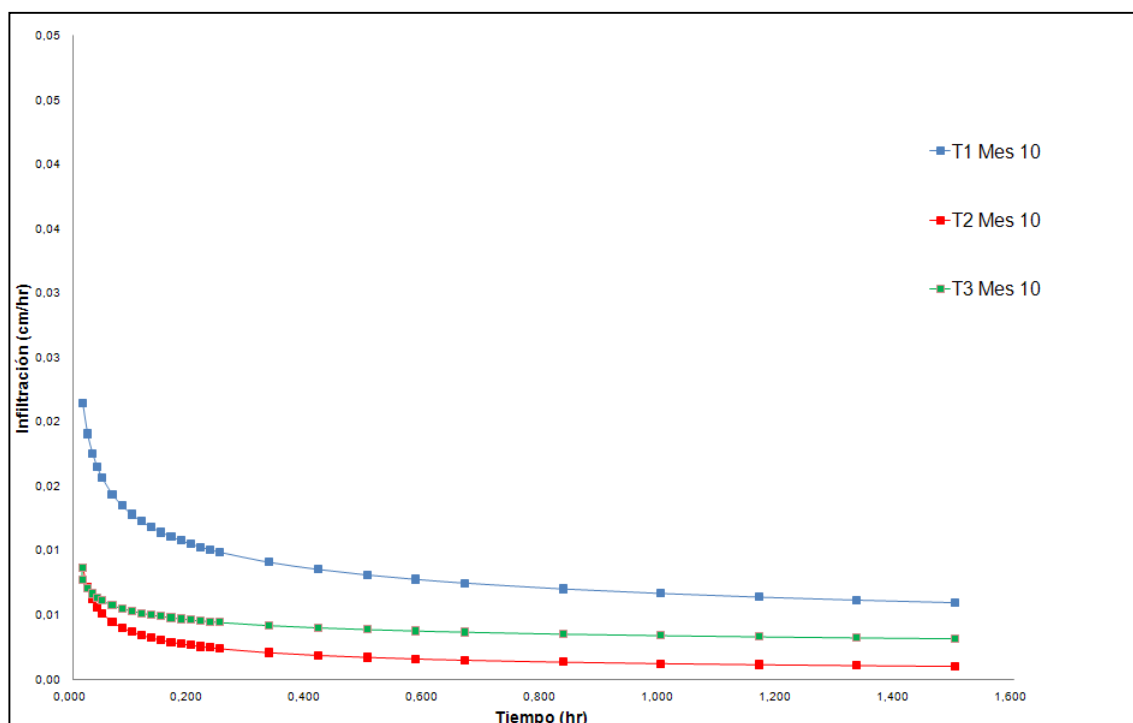


Figura 11. Curvas de infiltración básica para los tratamientos evaluados en el mes 10.

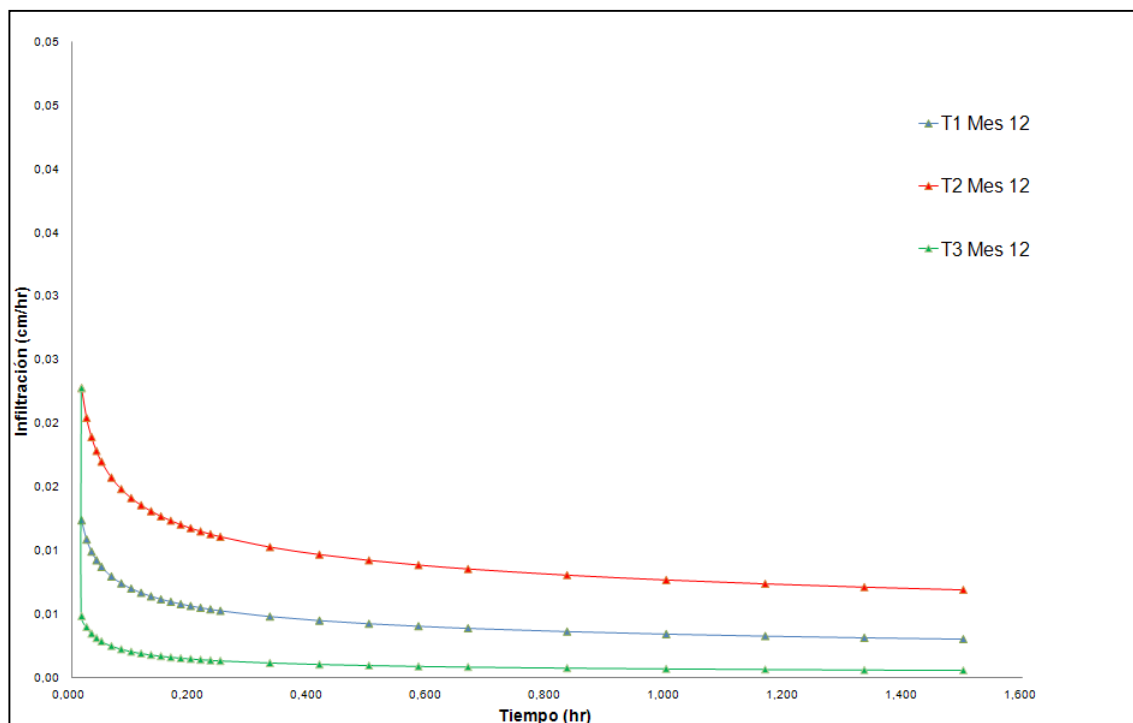


Figura 12. Curvas de infiltración básica para los tratamientos evaluados en el mes 12.

Estas variaciones en los resultados se correlacionan con las condiciones climáticas presentadas (Ver Figura 13). Según Coello *et al.*,(2007) la variación climática, junto con la heterogénea distribución espacial de algunas propiedades físicas y químicas del suelo (Da, distribución de macro y microporos, bases intercambiables), conllevan a la expansión y contracción de las arcillas, provocando grietas, creando vías de flujo preferencial y cambiando la distribución del tamaño de los poros, condiciones que afectaron el movimiento del agua dentro del mismo, Martínez,(2008) relaciona las épocas de alta precipitación con el aumento de los valores de Da, como se mencionó anteriormente esto tiende a disminuir los valores de infiltración como se evidencia en el mes 12 para los T1 y T3 (9.24 m/día y 1.17 m/día respectivamente).

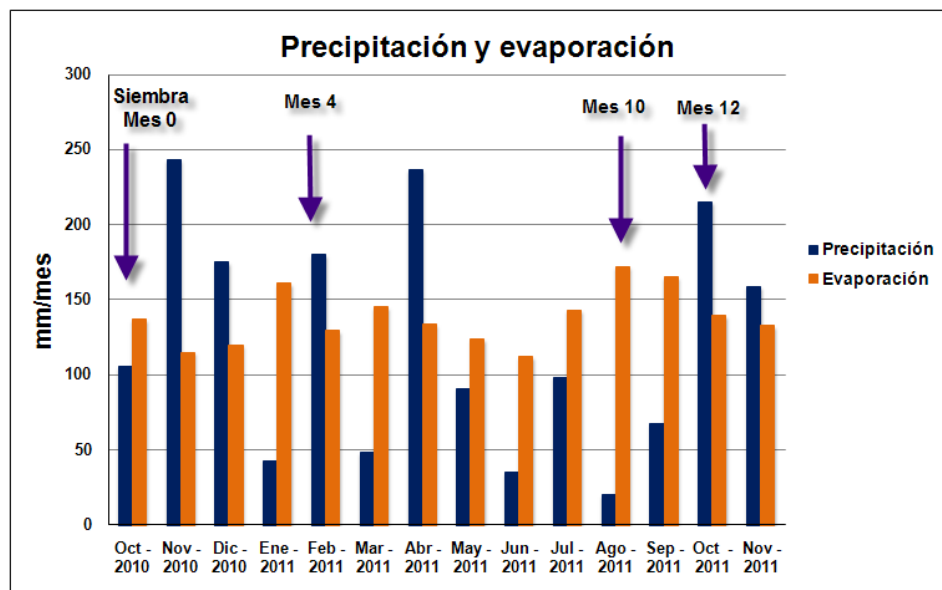


Figura 13. Comportamiento de la precipitación y evaporación para el desarrollo del cultivo. Fuente: URL-1.

En general el comportamiento de los valores de infiltración no permite inferir de manera contundente cual tratamiento presentó una incidencia significativa, esto se refleja en los valores de P (> 0.05) para todos los tratamientos(Ver ANEXO C). El comportamiento del flujo de agua en presencia de vías de flujo preferencial impone observar precauciones extremas cuando se quiere evaluar la infiltración del agua en el suelo con los

anillos infiltrómetros; las diferencias en el flujo entre las vías preferenciales y el suelo normal pueden llevar a establecer modelos de infiltración erróneos (Jaramillo, 2006).

6.3.2 Conductividad hidráulica saturada

En la Tabla 15 se presentan los valores de conductividad hidráulica de cada tratamiento con su respectivo bloque para el periodo de estudio. Para el muestreo inicial se tomaron dos puntos de que correspondían a la ubicación del bloque 1 y 2, estos muestreos se efectuaron antes de la aplicación de los tratamientos.

Tabla 15. Conductividad hidráulica para los tratamientos evaluados en el periodo de estudio.

	Tratamiento	Mes			
		0	4	10	12
Promedio (m/día)	T1	0,21	0,62	0,66	3,74
	T2		0,25	0,52	0,29
	T3		0,35	0,37	0,21
Desviación Estándar	T1	0,04	0,52	0,53	5,36
	T2		0,11	0,28	0,11
	T3		0,23	0,14	0,04
Coeficiente de Variación (%)	T1	0,17	83,93	80,97	143,35
	T2		43,29	53,55	39,01
	T3		64,65	38,22	20,20

De la Tabla 15 se puede inferir que, aunque la interpretación de los datos manifieste rangos de conductividad hidráulica como lenta, en algunos casos como muy lenta, se presenta variabilidad en el periodo de estudio para los distintos tratamientos, con coeficientes de variación mayores al 20% para todos los tratamientos en los periodos de estudio establecidos, estas variaciones se pueden atribuir, entre otros factores, a los altos niveles de magnesio presentados en el suelo que como se había mencionado anteriormente y según García *et al.*, (1997) afectan las propiedades del suelo, como la pérdida de conducción del agua (infiltración, conductividad hidráulica, permeabilidad), ya que el ion Mg^{+2} promueve la dispersión y la expansión de las arcillas y causa efectos adversos similares a los del Na^{+} , produciendo oclusión de poros y disminuyendo las propiedades de flujo de los suelos (García, 1994). Las características presentadas impiden

correlacionar de forma directa los valores de infiltración y de conductividad hidráulica para los tratamientos.

Según De María *et al.*, (2010) encontraron que los valores obtenidos de conductividad hidráulica saturada, no fueron significativamente afectados por la aplicación de biosólidos en un suelo Oxisol degradado y cultivado con maíz, además que bajo condiciones de campo, los coeficientes de variación fueron generalmente altos. También explican que la aplicación de los biosólidos al suelo pudo no haber sido uniforme y esto contribuyó a la falta de diferencias significativas entre tratamientos.

Con respecto a las propiedades físicas del suelo, se presentó un comportamiento atípico en la estructura, el cual se manifestó en los resultados, como es de destacar en las pruebas de infiltración, debido a que en algunos casos se debía cambiar el área de muestreo, pues se presentaron casos en que la infiltración era demasiado rápida o extremadamente lenta, al igual que en las pruebas de conductividad hidráulica en cuyo caso se presentaban comportamientos muy variados dentro del mismo surco, esto se atribuye a discontinuidades estructurales presentadas en el área de estudio, según Portaet *al.*,(1994) reporta que las propiedades físicas pueden ser muy distintas, según como se hallen agregadas las partículas individuales; cabe agregar que en algunos muestreos se presentó encostramiento superficial, el cual según Baver *et al.*,(1973) se da por una fuerza externa (en este caso la precipitación) cuando está cae sobre el suelo seco, se produce de una manera casi instantánea la disgregación de los agregados seguida por la dispersión y orientación de las partículas más finas y la oclusión de los poros al penetrar estas partículas de suelo. Para las pruebas de conductividad hidráulica se tomaron dos puntos a lo largo del surco central por tratamiento, en alguno de los cuales se observaron casos de flujo preferencial.

Estos resultados responden a la descripción dada por Torrente *et al.*, (2003) para este tipo de suelos, en los cuales se presenta una alta retención de humedad, limitada disponibilidad de agua para las plantas, bajas tasas de infiltración y conductividad hidráulica clasificada como lenta.

6.4 PROPIEDADES AGRONÓMICAS

6.4.1 Altura del tallo

Según Amaya *et al.*, (1995) para los meses más representativos la altura del tallo se encuentra en promedio para sus primeros cuatro meses en 30 cm, para los diez meses en 190 cm y para su etapa final (doce meses) en 220 cm.

En la Figura 15 se observa el comportamiento del crecimiento de tallos a lo largo del periodo evaluado para los distintos tratamientos, esta grafica se realizó con los valores medios de cada tratamiento.

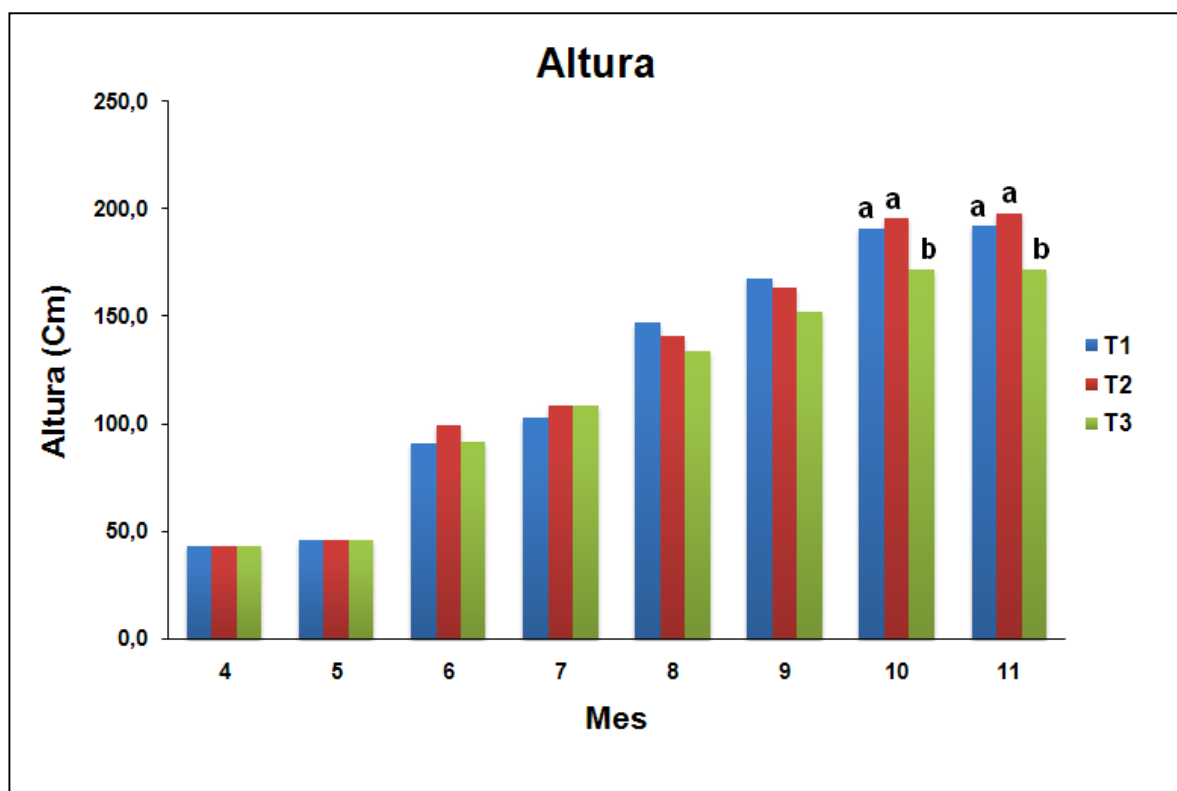


Figura 14. Altura del tallo para los distintos tratamientos durante el periodo de estudio.

Tabla 16. Comportamiento de la altura para el periodo de estudio evaluado.

	Tratamiento	Mes							
		4	5	6	7	8	9	10	11
Promedio (cm)	T1	42,8	45,9	91,2	103,1	147,0	167,6	190,9	192,2
	T2	43,1	45,8	99,5	108,7	140,9	163,5	195,8	198,1
	T3	42,8	45,6	91,6	108,4	134,0	152,3	172,1	172,1
Desviación Estándar	T1	4,66	3,34	1,20	9,35	15,46	4,01	8,28	6,40
	T2	6,88	6,74	6,51	18,29	2,62	7,43	15,27	18,48
	T3	10,49	10,21	8,82	10,28	14,47	23,65	0,00	0,00
Coefficiente de Variación (%)	T1	10,88	7,27	1,31	9,07	10,52	2,39	4,34	3,33
	T2	15,97	14,72	6,55	16,82	1,86	4,55	7,80	9,33
	T3	24,54	22,41	9,63	9,48	10,80	15,52	0,00	0,00

Se observa que, el comportamiento de la variable altura en general se encuentra dentro de los rangos descritos por Amaya *et al.*,(1995). Presentándose para el mes cuatro un valor por encima al descrito anteriormente (Ver Tabla 16), aunque sin diferencia significativa (Ver ANEXO D).

Para el mes 10 y 11 se presentó una diferencia significativa ($P = 0,005$ y $P = 0,003$ respectivamente), basados en las pruebas de Tukey (Ver ANEXO E) se evidencia que existe una diferencia entre los tratamientos T1 y T3; T2 y T3 con predominancia del T2; para el T1 se presenta una similitud con el T2. El comportamiento de esta variable se influenció por las variables climáticas presentadas como se observa en la Figura 13 los valores de evaporación predominaron sobre la precipitación, según De Geus, (1967) las altas temperaturas, conjuntamente con las altas humedades en el suelo y en el aire favorecen el desarrollo vegetativo, mientras que el ambiente seco y caliente promueve la maduración de la planta.

6.4.2 Grosor del tallo

Según lo reportado por Amaya *et al.*,(1995) el grosor del tallo se encuentra en promedio entre 28 y 36 mm para su etapa final. En la Figura 14 se observa el comportamiento del grosor de tallos a lo largo del periodo evaluado para los distintos tratamientos, esta grafica se realizó con los valores medios de cada tratamiento.

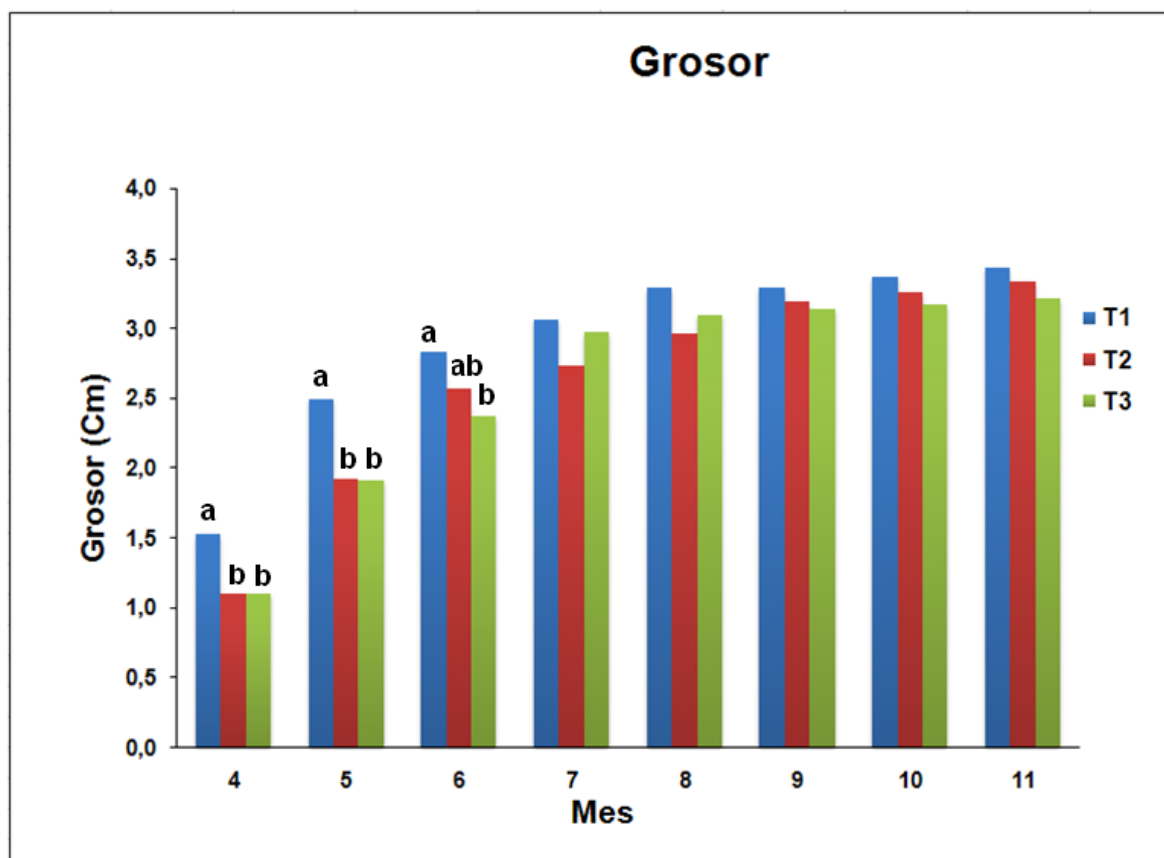


Figura 15. Grosor del tallo para los distintos tratamientos durante el periodo de estudio.

Tabla 17. Comportamiento del grosor para el periodo de estudio evaluado.

Tratamiento		Mes							
		4	5	6	7	8	9	10	11
Promedio (cm)	T1	1,5	2,5	2,8	3,1	3,3	3,3	3,4	3,4
	T2	1,1	1,9	2,6	2,7	3,0	3,2	3,3	3,3
	T3	1,1	1,9	2,4	3,0	3,1	3,1	3,2	3,2
Desviación Estándar	T1	0,13	0,19	0,24	0,24	0,03	0,07	0,05	0,08
	T2	0,10	0,08	0,06	0,02	0,29	0,02	0,08	0,08
	T3	0,07	0,21	0,08	0,08	0,06	0,10	0,10	0,18
Coeficiente de Variación (%)	T1	8,65	7,58	8,50	7,87	0,86	2,01	1,54	2,34
	T2	9,03	3,91	2,39	0,69	9,85	0,59	2,31	2,26
	T3	6,00	10,88	3,59	2,85	1,98	3,30	3,28	5,57

Para la variable grosor se obtuvieron datos por encima de los reportados por Amaya *et al.*, (1995) debido a que, para el mes 11 se tienen datos por encima de los 30 mm (Ver Tabla

17), aunque no se presentan diferencias significativas para este mes. En cuanto al coeficiente de variación se obtuvo una baja dispersión, con valores menores al 10% indicando poca variabilidad de los datos obtenidos.

Para los meses 4, 5 y 6 se presenta una diferencia significativa ($P = 0,004$, $P = 0,004$ y $P = 0,017$ respectivamente (Ver AnexoE)) entre los tratamientos T1 y T3; T2 y T3. Se evidencia que el T1 predominó durante toda la etapa experimental, en este caso los altos valores de precipitación conllevaron a que se presentaran saturaciones de humedad, que posiblemente afectaron el aporte de nutrientes por parte del biosólido, este también se afectó por las condiciones del suelo, ya que este tiende a ser alcalino (Ver Tabla 10) y el aporte de calcio por parte de los biosólidos generaron un aumento en el pH, lo cual limitó la disponibilidad de nutrientes.

6.4.3 Distancia entre nodos

De acuerdo a Amaya *et al.*, (1995), la distancia promedio entre nodos de la variedad CC85-92 se encuentra entre 9 y 15 cm para su etapa final.

En la Figura 15 se observa el comportamiento de la distancia entre nodos a lo largo del periodo evaluado para los distintos tratamientos, al igual que las dos anteriores propiedades, esta grafica se realizó con los valores medios de cada tratamiento.

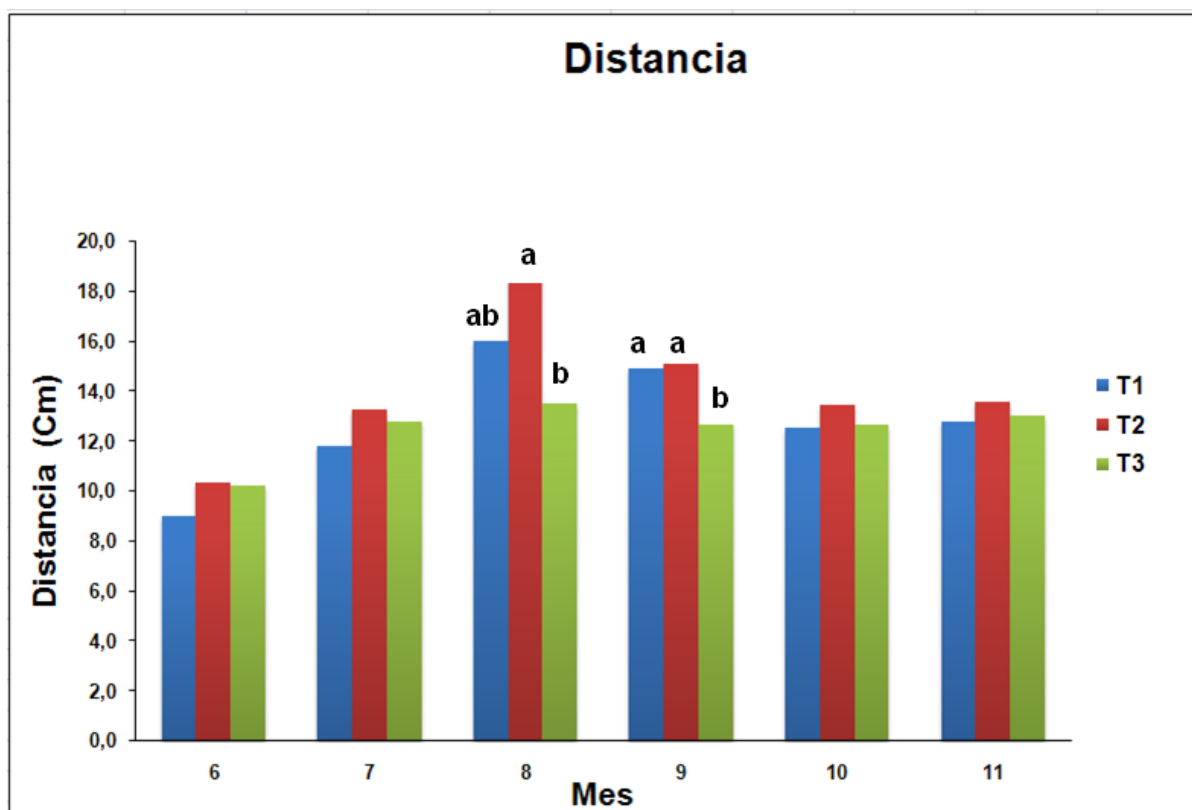


Figura 16. Distancia entre nodos para los distintos tratamientos durante el periodo de estudio.

Tabla 18. Comportamiento de la distancia para el periodo de estudio evaluado.

Tratamiento		Mes							
		4	5	6	7	8	9	10	11
Promedio (cm)	T1			9,0	11,8	16,0	14,9	12,6	12,8
	T2			10,3	13,2	18,6	15,1	13,4	13,6
	T3			10,2	12,8	13,5	12,6	12,7	13,0
Desviación Estándar	T1			0,75	0,16	3,36	0,57	0,56	0,84
	T2			2,03	2,48	5,31	0,48	0,70	0,89
	T3			1,21	0,99	1,82	0,77	0,00	0,47
Coeficiente de Variación (%)	T1			8,34	1,32	20,94	3,82	4,43	6,58
	T2			19,68	18,76	28,60	3,18	5,19	6,53
	T3			11,82	7,75	13,47	6,13	0,00	3,63

Para el mes 11 se reportan valores dentro del rango descrito por Amaya *et al.*, (1995), exceptuando el mes 8 y 9, en los cuales se presentó una diferencia significativa ($P=0.02$ y $P=0.007$ respectivamente) (Ver ANEXO E), para el mes 8 se presentaron valores del coeficiente de variación mayores respecto a los otros meses (Ver Tabla 19) con predominancia del T2.

Del análisis de las propiedades agronómicas del cultivo se pudo observar que solamente se presentaron cambios significativos con respecto al biosólido en la variable altura del tallo, siendo favorable para el T2; para las otras variables se presentaron rangos dentro del desarrollo normal reportado por Amaya *et al.*, (1995) inclusive con predominancia del T1. En las tablas 18-20 se observa que los coeficientes de variación se presentaron en un rango más uniforme que para las propiedades hidrodinámicas, con valores menores al 25%. Las altas precipitaciones en las primeras etapas de desarrollo del cultivo (Ver Figura 13) se reflejan en los resultados obtenidos, en general no se reportaron resultados mayores a los expuestos en la literatura. Según Figueroa *et al.*, (2009), durante sus primeras etapas de desarrollo, la caña requiere de una humedad adecuada, pero el consumo de agua es bajo, relacionado con la limitada expansión del sistema radicular y foliar, para los primeros 4 meses de estudio la precipitación predominó por lo cual el crecimiento se vio afectado en esta etapa. Con respecto a la última etapa de desarrollo Romero *et al.*, (2009) destacan la radiación solar como un factor importante, no solo por sus efectos indirectos (variaciones térmicas, evapotranspiración, entre otros.), sino fundamentalmente por su incidencia en la actividad fotosintética, la que determinará el nivel de crecimiento y la acumulación de materia seca. En general, intensidades crecientes de radiación lumínica se asocian con incrementos en la producción y de azúcar por unidad de superficie, ya que este cultivo ha evidenciado ser de las especies más eficientes en responder a elevadas intensidades lumínicas; como se evidencia en los meses 7 al 11 predominó la evaporación y en estos fueron los que se presentaron la mayoría de las diferencias significativas para las propiedades agronómicas.

7. CONCLUSIONES

El análisis de las propiedades hidrodinámicas muestra que se presentaron variaciones en el periodo de estudio, aunque sin diferencias significativas, lo cual indica que no se debieron directamente a los tratamientos implementados. Los suelos que contienen altos niveles de magnesio intercambiable se les atribuyen problemas con el movimiento del agua, es importante resaltar que el aporte de Ca por parte del biosólido también influyó en los resultados obtenidos, ya que este ion genera problemas de cementación.

La alta variabilidad de los resultados de las propiedades hidrodinámicas responde a las características del tipo de suelo en el que se trabajó donde las propiedades vérticas cambian la configuración de la porosidad. El movimiento del agua se restringió por los altos valores de D_a y microporosidad presentados.

Del estudio de las propiedades agronómicas del cultivo, se concluye que debido a las condiciones presentadas, tanto por las características físicas y químicas del suelo, tales como la estructura del suelo, el tipo de minerales de arcilla y el desequilibrio en las relaciones Ca/Mg y K/Mg, como las variables climáticas presentadas, las diferencias significativas no fueron muy marcadas y la mayoría se dieron en la última etapa de desarrollo.

Las altas precipitaciones presentadas en el periodo de estudio y las propiedades físicas del suelo como lo son sus características vérticas, problemas de flujo preferencial y alta saturación del ion Mg^{+2} , conllevaron a que se presentaran saturaciones de humedad, que afectaron el aporte de nutrientes por parte del biosólido, aunque es de aclarar que con respecto a las propiedades agronómicas del cultivo el T2 presentó algunas diferencias significativas, lo cual apunta a que probablemente si se hubieran presentado mejores condiciones de terreno y clima este tratamiento habría dado resultados más diferenciados.

8. RECOMENDACIONES

Con respecto al biosólido aplicado, se recomienda prolongar el tiempo de estudio para evaluar los aportes nutricionales que puedan generar a largo plazo y analizar los cambios que se generen en las propiedades físicas y químicas del suelo.

Además de la aplicación del biosólido, se recomienda reforzarlo, incorporándole otros tipos de materia orgánica o bien inorgánica, para ampliar el rango de los resultados obtenidos, bien sea en las propiedades del suelo o cultivo evaluado.

Ampliar el estudio para otras variables del cultivo como lo son: TCH y contenido de sacarosa, ya que estas son de vital importancia para la industria azucarera.

Se recomienda que estos estudios se realicen en otros tipos de suelo, con el fin de evaluar los cambios generados por la incorporación de los biosólidos, ya que reforzaría los resultados obtenidos, dando una base sólida para una futura utilización a gran escala de estos materiales.

Analizar un mayor número de plantas y definir una zona clara de marcación para las propiedades agronómicas, procurando tomar las medidas en las mismas plantas para el periodo de estudio, ya que los resultados serían más representativos, de igual manera se recomienda ampliar el número de muestreos y repeticiones para las propiedades hidrodinámicas con el fin de tener un seguimiento que represente las variaciones presentadas en el periodo de estudio.

9. BIBLIOGRAFÍA

ADEME- AGENCE DE L'ENVIRONNEMENT ET DE LA MAITRISE DE L'ENERGIE. 2002. Déchets organiques. Composts de boues de stations d'épurations municipales: qualités agronomiques et utilisation. ADEME Éditions. France, Septembre. N° 3276. 428 Págs.

Amaya, A; Cock, J; Hernández, A; Irvine, J. 1995. Biología. En: CENICAÑA. El cultivo de la caña en la zona azucarera de Colombia. Cali, Colombia. Págs.: 31-62.

Araque, M. 2006. Evaluación de los tratamientos térmico y alcalino en la desinfección del lodo generado en la PTAR El Salitre. Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia. 16 Págs.

Barrios, C; Cortés, E. 2010 Ajuste del Calendario de Temporadas Secas y Lluviosas Para el Valle del Río Cauca, Informe anual: Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia- CENICAÑA, Santiago de Cali.

Baver, L; Gardner, W; Gardner, R. 1973. Física de suelos. Centro Regional de Ayuda Técnica. Agencia para el desarrollo internacional. México D.F. 529 Págs.

Borges, E. 2006. Uso agrícola de los biosólidos de aguas residuales urbanas y su efecto en algunas propiedades del suelo y la respuesta fisiológica del tomate (*lycopersicon esculentum* mill). Presentada en el Centro Universitario de Guantánamo para la obtención al grado Científico de Doctor en Ciencias Agrícolas. La Habana, Cuba. 157 Págs.

Bronik, C. & Lal, R. 2005. Soil structure and management: a review. Geoderma 124. Págs 3 –22

Castellanos R., J.Z. 1982. La importancia de las condiciones físicas del suelo y su mejoramiento mediante la aplicación de estiércoles. Seminarios Técnicos 7(8): 32. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias-Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. Torreón, Coahuila, México.

CENICAÑA – Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia. 2002. Características agronómicas y de productividad de la variedad Cenicaña Colombia (CC 85-92). Cali, Colombia. 90 Págs.

Clapp, C.E., Larson, W.E., Dowdy, R.H. 1994. Sewage Sludge: Land Utilization and the Environment (SSSA Miscellaneous Publication). American Society of Agronomics, Inc., Madison. 249 Págs.

Coello, C; De Bièvre, B; Pacheco, E; Cisneros, P. 2007. Análisis de métodos de estimación de la Conductividad hidráulica saturada en suelos Degradados. Universidad de Cuenca. Cuenca, Ecuador. 19 Págs.

Daguer, G. 2003. Gestión de biosólidos en Colombia. En: 46º Congreso Internacional de ACODAL, Sociedad, Ambiente y Futuro. Pontificia Universidad Javeriana. Santafé de Bogotá, Colombia. 7 Págs.

De Geus, J. 1967. Fertilizer guide for tropical and subtropical farming. Centre d'ETude de l'Azote, Zurich. 727 Págs.

De María, I.C.; Chiba, M.K.; Costa, A.; Berton, R.S. 2010. Sewage sludge application to agricultural land as soil physical conditioner. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 34. Págs 967-974

Doerr, S. H.; R. A. Shakesby & R. P. D. Walsh. 2000. Soil water repellency, its characteristics, causes and hydro-geomorphological consequences. Earth Sci. Rev. 51: 33-65. Págs.

EMCALI. Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Cañavalejo (PTAR - C), Santiago de Cali. 2000. En: 43 Congreso Nacional de ACODAL, Tratamiento y uso de aguas residuales: Una estrategia para el futuro del saneamiento. Cartagena, Colombia. 24 Págs.

EMCALI. Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Cañavalejo (PTAR - C), Santiago de Cali. 2007. Resultados de investigación en Agua potable, aguas residuales y biosólidos. Cali, Colombia. 48 Págs.

EPA -U.S. Environmental Protection Agency, 1993. Standards for the Use or Disposal of Sewage Sludge; Final Rules. EPA 40 CFR Part 257. Washington, D.C. U.S. 348 Págs.

EPA -U.S. Environmental Protection Agency, 1999. Biosolids Generation, Use, and Disposal in the United States: Solid Waste and Emergency Response. EPA 530-R-99-0094. Washington, D.C. U.S. 81 Págs.

EPA - U.S. Environmental Protection Agency, 2000. Folleto informativo de tecnología de biosólidos. Aplicación de biosólidos al terreno. EPA 832-F-00-064. Washington, D.C. U.S. 13 Págs.

EPA - ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. 2003. Control of pathogens and vector attraction in sewage sludge under 40 CFR part 503. Office of Water/ Office Science and Technology Sludge/ Risk Assessment Branch. Washington. 173 Págs.

FAO – U.S. Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1963. High Dam Soil Survey Project. Aswan-Deb BC. Rome.

FAO – U.S. Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1985. Water quality for agriculture. FAO Irrigation and Drainage Paper. University of California, California, U.S.

Fetter, C.W. 2001. Applied Hydrogeology. Ed. Bell and Howell Comp. Columbus, U.S. 488 Págs.

Figuerola, L.; Romero.; Fadda, G. 2009. CAPITULO 8. EL RIEGO DE LA CAÑA DE AZÚCAR. En: Manual del cañero. Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombes. Las Talitas, Tucumán, Argentina. 248 Págs

Franco, A, Hamilton, C, Perecin, D, Carvalho, F, Ribeiro, A. C.; Santoro, V. 2010. Sewage sludge as nitrogen and phosphorus source for cane-plant and first ratoon crops. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 34. Págs. 553-561

García, A; Borrero, J; Gómez, C. 1997. Propuesta de una clasificación de suelos en una región del Valle del Río Cauca. En: Conservación de suelos y aguas en la zona andina.

Hacia el desarrollo de un concepto integral. Memorias del taller internacional regional. CIAT – Centro Internacional de Agricultura Tropical. Cali, Colombia. 227 Págs.

García O., A. 1994. Diagnóstico y control de la fertilidad en suelos afectados por sales y sodio. Fertilidad de suelos. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. Santafé de Bogotá. Págs. 469-505.

Guitierrez, H; y De la Vara, R. 2003. Análisis y diseño de experimentos. McGraw-Hill, Interamericana. México. 571 Págs.

Herrera, W; Verdugo, F. 2011. Efecto del uso de aguas residuales tratadas de la planta de Cañaveralejo – Cali (PTAR-C) con fines de riego en caña de azúcar (*Saccharum Officinarum*) en propiedades físicas de un suelo vertisol. Presentada en la Universidad del Valle para la obtención al grado de Ingenieros Agrícolas. Cali, Colombia. 106 Págs.

IGAC. 1990. Estudio semidetallado de suelos del Valle Geográfico del Río Cauca. INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTIN CODAZZI. Bogotá. Colombia. 550 Págs.

Ingallinella, A., Sanguinetti, G., Koottatep, T., Montangero, A. & Strauss, M. 2001 The challenge of faecal sludge management in urban areas-strategies, regulations and treatment options. En: Sludge Management: regulation, treatment, utilization and disposal. Acapulco. México. 9 Págs.

INIA–Instituto de Investigaciones Agropecuarias. 2003. Toma de muestras e interpretación de análisis de fertilidad de suelo. Santiago de Chile, Chile. 7 Págs.

Jaramillo, D, 2001. Introducción a la Ciencia del Suelo. Universidad Nacional de Colombia, Escuela de Geociencias, Medellín, Colombia. 593 Págs.

Jaramillo, D. 2006. Repelencia al agua en suelos: Una síntesis. Universidad Nacional de Colombia, Escuela de Geociencias, Medellín, Colombia. 18 Págs.

Jaramillo, J. 2007. Drenaje Agrícola. Universidad Nacional de Colombia. Departamento de Ingeniería. Palmira. 173 Págs.

Landon, J. 1984. Tropical soil manual. Booker agriculture. International Limited. Londres. 450 Págs.

Martínez, E. 2008. Estudio de propiedades hídricas del suelo mediante medidores de actividad de agua en la zona regable de Terra Chá. Presentada en la Universidad de Santiago de Compostella para la obtención al grado de doctorado. Lugo, España. 524 Págs.

Merli, G.; Ricciuti, N. 2009. Microbiología de las aguas residuales – aplicación de biosólidos en suelo. Universidad Tecnológica Nacional. Bahía Blanca, Argentina. 25 Págs.

Metcalf y Eddy. 2003. Wastewater engineering treatment and reuse. Fourth edition. McGraw Hill. New York. U.S. 1819 Págs.

Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial. 2009. Propuesta de norma, versión de abril. Colombia. 16 Págs.

Munera, M, 2008. Efecto de la aplicación del biosólido de la PTAR de Río Frío (Floridablanca, Santander, Colombia), compostado o estabilizado con cal, en plantas de lechuga *lactuca sativa*, guadua *bambusa guadua* y samán *pithecellobium saman*. CIAGA-Comité de Investigación Aplicada para la Gestión Ambiental. Boletín No. 003. Bucaramanga, Colombia. 6 Págs.

Narro, E. 1994. Física de suelos. Con enfoque agrícola. Editorial Trillas. México. 195. Págs.

Ocampo, A. Guerrero, R 1994. Capítulo 10. CAÑA DE AZÚCAR, En: Fertilización de cultivos en clima cálido. Monómeros Colombo Venezolanos, S.A. (E.M.A.). Universidad Nacional de Colombia. 290 Págs.

Peñarete, W. 2012. Efecto de la aplicación de biosólidos sobre las propiedades físicas de un suelo cultivado con caña de azúcar (*Saccharum officinarum*). Presentada en la Universidad del Valle para la obtención al grado de Maestría en ingeniería. Cali, Colombia.

Porta, J. 1994. Introducción a la Edafología: uso y protección del suelo. Ediciones Mundi-Prensa. Barcelona, España. 448 Págs.

Pu, G; Bell, M; Barry, G; Want, P. 2004. Effects of applied biosolids on forage sorghum production and soil major nutrient status in an alluvial clay loam soil in southeast Queensland, Australia. En: SuperSoil 2004: 3rd Australian New Zealand Soils Conference. University of Sydney. Sydney, Australia. 6 Págs.

Quintero, R. 1993. Interpretación del análisis de suelo y recomendaciones de fertilizantes para la caña de azúcar. Cenicaña. Serie Técnica No. 14. Cali, Colombia. 17 Págs.

Quintero, R. 1995. Fertilización y nutrición. . En: CENICAÑA. El cultivo de la caña en la zona azucarera de Colombia. Cali, Colombia. Págs.: 153-177.

Ramírez, R.; Pérez M.I. 2006. Evaluación del potencial de los biosólidos procedentes del tratamiento de aguas residuales para uso agrícola y su efecto sobre el cultivo de rábano rojo (*Raphanus sativus* L). Universidad Nacional de Colombia. Medellín, Colombia. 14 Págs.

Ramírez, R.; Velásquez, D.; Acosta E. 2007. Efecto de la aplicación de biosólidos en el crecimiento de Gualanday (*Jacaranda mimosifolia*) y en las condiciones físicas y químicas de un suelo degradado. Revista Facultad Nacional de Agronomía - Medellín. Vol.60, No.1. Págs.: 3751-3770.

Ramos, O. 2005. Caña de azúcar en Colombia. Revista de Indias Vol. LXV, No 233 (2005). ASOCAÑA. Págs.: 49-78.

Ranjel, J.; Viveros, V.; Amaya, E.; Gómez, L.; Victoria, K.; Angel, S. 2003. Catálogo de variedades. Cenicaña. Serie Técnica No.31. Segunda edición. Cali, Colombia. 88 Págs.

Rodriguez, D.; Mendes, J. 1997. Effect of soil moisture content and the irrigation frequency on the sugarcane germination. Araras, Brasil. 10 Págs.

Romero, E.; Scandaliaris, J.; Digonzelli, P.; Neme, M.; Giardina, J.; Ullivarri, J.; Casen, S.; Tonatto, M.; Alonso, L. 2009. CAPITULO 1. LA CAÑA DE AZUCAR. Características y

ecofisiología. En: Manual del cañero. Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres. Las Talitas, Tucumán, Argentina. 248 Págs.

SANEPAR - Companhia de Saneamento do Paraná. 1999. Uso e manejo do lodo de esgoto na agricultura. SANEPAR. Curitiba, Brasil. 98 Págs.

Silva, J. A., Torres, P., Cardoza, Y. 2012. Effect of processes to further reduce pathogens of biosolids on nitrogen mineralization rates. Environmental Management. Accepted in press.

Tafur, H. 2008. Guía metodológica para la determinación de algunos parámetros en riegos y drenajes. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias Agropecuarias. Palmira. 103 Págs.

Tasso, L.; Marques, M.; Franco, A.; Nogueira, G.; De Nobile, F.; Camilotti, F.; Da Silva, A. 2007. Produtividade e qualidade de cana-de-açúcar cultivada em solo Tratado com lodo de esgoto, vinhaça e adubos minerais. Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v.27, n.1, Págs.276-283

Thompson, L.M. 2002. Los Suelos y su fertilidad. Reverte S.A. Barcelona, España. 627 Págs.

Torrente T.; García-Ocampo, A.; Escobar, Ch. Amézquita C.; Sampayo, N. 2003. Condiciones hidrofísicas de suelos con alta saturación de magnesio en el Valle del Cauca, Colombia. Acta agronómica Vol. 52 (1-4).Págs.: 29-37

Torres, P.; Madera, C. y Silva, J. 2009. Eliminación de patógenos en biosólidos por estabilización alcalina. Acta agronómica. Vol 58 (3). Cali, Colombia. Págs.: 197-205.

Tovar, J. 2007. Estructura y poder de mercado en el sector de agroquímicos en Colombia. Facultad de Economía- CEDE. Universidad de los Andes. Bogotá, Colombia. 106 Págs.

Tsadilas, C.; Mitsios, I.; Golia, E. 2005. Influence of Biosolids Application on Some Soil Physical Properties. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 36. Grecia. Págs.: 709–716.

Urbano, P. 1995. Tratado de fitotecnia general. Mundi-Prensa. Madrid, España. 895 Págs.

Vélez, J. A. 2007. Los biosólidos: ¿una solución o un problema?. Universidad Nacional de Colombia. Medellín, Colombia. 15 Págs.

Villegas, F. 2010. Maduración y crecimiento de la caña de azúcar. En: Carta trimestral. Cenicaña. v.32, nos. 1 y 2. Págs.: 47-54.

Referencias URL

URL-1. Boletines diarios de la Red Meteorológica Automatizada - RMA. Disponible en: http://www.cenicana.org/clima_/boletin_meteoro_diario.php?. Consultado en Enero 2012.

10. ANEXOS

ANEXO A. MÉTODO DE MUESTREO EN CAMPO PARA EL ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES HIDRODINÁMICAS DEL SUELO.

- **Conductividad Hidráulica**

El método con el cual se evaluó la conductividad hidráulica, se conoce como el método del pozo invertido (método de Porchet), se utilizó este método debido a que no se encontró nivel freático. Para la realización de esta prueba se construyó un pozo con ayuda de un barreno, y se aplicó agua al pozo hasta lograr un tirante considerable, de tal forma que, posteriormente, con la ayuda de un flotador y una cinta métrica, se tomaran los valores para calcular conductividad hidráulica del suelo.

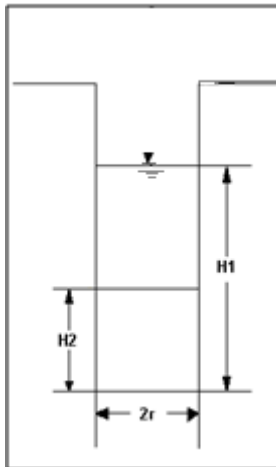


Figura 17. Prueba de conductividad hidráulica.

Tabla 19.Formato de registro de datos para la prueba de conductividad hidráulica.

Bloque	Surco
Profundidad (cm)	Diámetro (cm)
t (min)	Y (cm)

Para el estudio de esta propiedad se realizó una caracterización inicial (Mes 0), eventualmente se tomaron muestras en los meses 4, 10 y 12. Estas muestras se tomaron del surco central de cada tratamiento, y se efectuaron 2 repeticiones.

La conductividad hidráulica realizada en campo se calcula con la siguiente fórmula:

$$k = \frac{\left[\log \left(H_1 + \frac{r}{2} \right) - \log \left(H_2 + \frac{r}{2} \right) \right] * 1.15 * r}{\Delta t}$$

Donde:

r = radio del pozo.

H1 = tirante inicial del agua en el pozo.

H2 = tirante final del agua en el pozo.

Δt = tiempo que tarda el agua en bajar del nivel inicial al final.

En la expresión anterior, si H1, H2 y r se expresan en cm, y Δt en seg, K resulta en cm/s.

- **Infiltración**

El método con el cual se evaluó esta propiedad consistió en el método de los anillos concéntricos, el cual consiste en colocar en el suelo, en forma concéntrica, dos anillos de lámina de hierro con agua y medir la cantidad de agua que penetra en el suelo por unidad de tiempo, hasta que esa tasa de entrada se vuelva constante; esta prueba se hace con cabeza hidráulica variable.

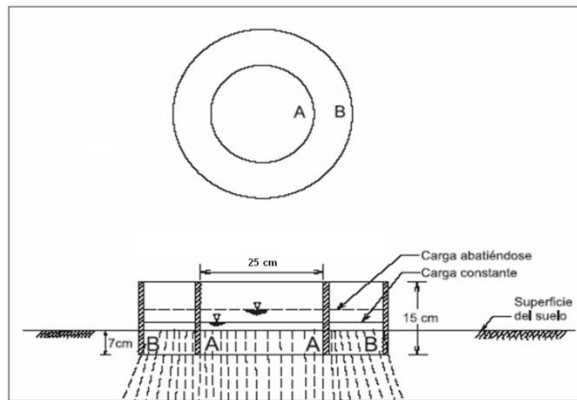


Figura 18. Prueba de infiltración.

Fuente. Tafur, 2008

Tabla 20. Formato de registro de datos para la prueba de Infiltración.

Bloque			Surco	
t (min)	Prof (cm)	Recarga	Lam Infiltrada	Lam Acum(cm)

Al igual que para la conductividad hidráulica, para el estudio de esta propiedad se realizó una caracterización inicial (Mes 0), eventualmente se tomaron muestras en los meses 4, 10 y 12. Estas muestras se tomaron del surco central de cada tratamiento, se tomó una muestra por tratamiento.

De acuerdo a la información obtenida, se calculan las ecuaciones para caracterizar la infiltración del suelo: la infiltración acumulada, la infiltración instantánea, y se determina la infiltración básica; esto por medio de regresiones lineales, para llegar a la ecuación de Kostiakov- Lewis:

$$Lam = bt^n$$

Donde:

Lam= Lámina de infiltración acumulada, expresada en mm.

b= Constante asociada a la infiltración inicial.

n= Exponente asociado a las condiciones del suelo.

Al derivar esta ecuación se obtiene la infiltración instantánea la cual se expresa como:

$$I = kt^{-n}$$

Donde:

I= Infiltración instantánea en mm/h ó cm/h

k= Velocidad de infiltración durante el intervalo inicial.

n= Exponente a dimensional negativo, entre 0 y -1. Corresponde a la pendiente de la curva e indica cómo la velocidad de infiltración disminuye con el tiempo.

Con la información anterior se calculó el tiempo de infiltración básica y por consiguiente la infiltración básica, expresada en cm/hr.

ANEXO B. MÉTODO DE MUESTREO EN CAMPO PARA EL ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES AGRONÓMICAS DEL CULTIVO.

Con respecto a la toma de datos para las propiedades agronómicas de la planta como el grosor del tallo, esta se determinó de la parte media de la planta; la distancia entre nodos se tomó del tercio superior de la planta; la altura se midió desde el suelo hasta la última lígula visible. Este procedimiento se realizó mensualmente, a partir del cuarto mes escogiendo cinco plantas al azar por cada surco. Los datos se registraron de acuerdo al formato presentado en la Tabla 19.

Tabla 21. Formato de registro de datos de las propiedades agronómicas del cultivo

Bloque	Tratamiento	Surco	Planta	Altura (cm)	Grosor tallo (cm)	Distancia nodos (cm)
		1	1			
			2			
			3			
			4			
			5			
		2	1			
			2			
			3			
			4			
			5			
		3	1			
			2			
			3			
			4			
			5			

ANEXO C. ANOVA PARA LAS PROPIEDADES HIDRODINAMICAS DEL SUELO.

- **Conductividad hidráulica**

Análisis de Varianza (Mes 4)					
	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Tratamiento	2	0,138958	0,069479	0,7072	0,5858
Bloque	1	0,119011	0,119011	1,2114	0,3858
Error experimental	2	0,196487	0,098244		

Análisis de Varianza (Mes 10)					
	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Tratamiento	2	0,07889	0,03945	0,2088	0,8272
Bloque	1	0,00434	0,00434	0,023	0,8934
Error experimental	2	0,37777	0,18888		

Análisis de Varianza (Mes 12)					
	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Tratamiento	2	0,224021	0,11201	1,2542	0,4436
Bloque	1	0,053304	0,053304	0,5969	0,5206
Error experimental	2	0,178616	0,089308		

- **Infiltración**

Análisis de Varianza (Mes 4)					
	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Tratamiento	2	376,29	188,15	1,1501	0,46509
Bloque	1	1655,68	1655,68	10,1209	0,08622
Error experimental	2	327,18	163,59		

Análisis de Varianza (Mes 10)					
	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Tratamiento	2	249,355	124,677	2,7004	0,2702
Bloque	1	29,26	29,26	0,6338	0,5095
Error experimental	2	92,338	46,169		

Análisis de Varianza (Mes 12)					
	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Tratamiento	2	415,03	207,52	0,7531	0,5704
Bloque	1	271,89	271,89	0,9867	0,4252
Error experimental	2	551,09	275,55		

ANEXO D. ANOVA PARA LAS PROPIEDADES AGRONÓMICAS DEL CULTIVO.

- **Altura del tallo**

Análisis de Varianza (Mes 4)					
	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Tratamiento	2	1,6	0,8	0,0026	0,9974
Bloque	1	341,8	341,8	1,1123	0,3094
Error experimental	14	4302,4	307,3		
Error de muestreo	72	4433,5	61,6		0,00000

Análisis de Varianza (Mes5)					
	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Tratamiento	2	1,8	0,9	0,0031	0,9969
Bloque	1	231,7	231,7	0,7863	0,3902
Error experimental	14	4124,8	294,6		
Error de muestreo	72	4160	57,8		0,00000

Análisis de Varianza (Mes 6)					
	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Tratamiento	2	1298,07	649,03	3,1629	0,07355
Bloque	1	1367,34	1367,34	6,6633	0,02175
Error experimental	14	2872,86	205,2		
Error de muestreo	72	5.392,800	74,900		0,00272

Análisis de Varianza (Mes 7)					
	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Tratamiento	2	604,1	302	2,2985	0,137
Bloque	1	7187,8	7187,8	54,6976	3,37E-06
Error experimental	14	1839,7	131,4		
Error de muestreo	72	4641,4	64,5		0,02636

Análisis de Varianza (Mes 8)					
	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Tratamiento	2	2524,7	1262,3	1,6254	0,2319
Bloque	1	13,3	13,3	0,0171	0,8977
Error experimental	14	10872,9	776,6		
Error de muestreo	72	9258,5	128,6		0,00000
Análisis de Varianza (Mes 9)					
	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Tratamiento	2	3761	1880,5	3,011	0,081722
Bloque	1	6157	6157	9,8585	0,007236
Error experimental	14	8743,5	624,5		
Error de muestreo	72	22361,5	310,6		0,02866
Análisis de Varianza (Mes 10)					
	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Tratamiento	2	9407,7	4703,9	7,5723	0,005902
Bloque	1	244,4	244,4	0,3934	0,540622
Error experimental	14	8696,7	621,2		
Error de muestreo	72	22146,4	307,6		0,02787
Análisis de Varianza (Mes11)					
	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Tratamiento	2	11154,8	5577,4	8,7621	0,003407
Bloque	1	729,9	729,9	1,1466	0,302367
Error experimental	14	8911,6	636,5		
Error de muestreo	72	22479,2	312,2		0,02623

- Grosor del tallo

Análisis de Varianza (Mes 4)					
	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Tratamiento	2	3,6696	1,8348	8,087	0,00463
Bloque	1	0,1361	0,1361	0,600	0,45148
Error experimental	14	3,1762	0,2269		
Error de muestreo	72	6,936	0,0963		0,00949

Análisis de Varianza (Mes 5)					
	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Tratamiento	2	6,504	3,252	7,982	0,00486
Bloque	1	0,016	0,016	0,039	0,84576
Error experimental	14	5,704	0,4074		
Error de muestreo	72	9,912	0,1377		0,00133

Análisis de Varianza (Mes 6)					
	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Tratamiento	2	3,245	1,622	5,488	0,01739
Bloque	1	0,0444	0,0444	0,1503	0,70405
Error experimental	14	4,1389	0,2956		
Error de muestreo	72	5,796	0,081		0,00013

Análisis de Varianza (Mes 7)					
	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Tratamiento	2	1,6909	0,8454	2,217	0,1457
Bloque	1	0,5921	0,5921	1,5527	0,2332
Error experimental	14	5,3389	0,3813		
Error de muestreo	72	15,428	0,2143		0,05866

Análisis de Varianza (Mes 8)					
	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Tratamiento	2	1,5629	0,7814	2,3618	0,1307
Bloque	1	0,3361	0,3361	1,0158	0,3306
Error experimental	14	4,6322	0,3309		
Error de muestreo	72	8,98	0,1247		0,00360

Análisis de Varianza (Mes 9)					
	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Tratamiento	2	0,3307	0,1653	0,271	0,7665
Bloque	1	0,016	0,016	0,0262	0,8737
Error experimental	14	8,5413	0,6101		
Error de muestreo	72	122.280	0.1698		0,00017
Análisis de Varianza (Mes 10)					
	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Tratamiento	2	0,58067	0,29033	1,5745	0,2417
Bloque	1	0,00278	0,00278	0,0151	0,9041
Error experimental	14	2,58156	0,1844		
Error de muestreo	72	10,164	0,1412		0,22554
Análisis de Varianza (Mes 11)					
	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Tratamiento	2	0,7109	0,3554	1,0877	0,3638
Bloque	1	0,0028	0,0028	0,0085	0,9278
Error experimental	14	4,5749	0,3268		
Error de muestreo	72	10,652	0,1479		0,01522

- **Distancia entre nodos**

Análisis de Varianza (Mes 6)					
	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Tratamiento	2	33,206	16,603	2,0847	0,1613
Bloque	1	0,028	0,028	0,0036	0,9532
Error experimental	14	111,498	7,964		
Error de muestreo	72	68,204	0,947		0,00000
Análisis de Varianza (Mes 7)					
	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Tratamiento	2	32,288	16,144	1,7042	0,2176
Bloque	1	8,962	8,962	0,946	0,3472
Error experimental	14	132,62	9,473		
Error de muestreo	72	103,308	1,435		0,00000
Análisis de Varianza (Mes 8)					
	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Tratamiento	2	384,57	192,28	5,0777	0,02197
Bloque	1	234,58	234,58	6,1945	0,02602
Error experimental	14	530,16	37,87		
Error de muestreo	72	807,01	11,21		0,00034
Análisis de Varianza (Mes 9)					
	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Tratamiento	2	114,587	57,293	7,0979	0,00744
Bloque	1	0,387	0,387	0,0479	0,82989
Error experimental	14	113,007	8,072		
Error de muestreo	72	484,98	6,74		0,29625
Análisis de Varianza (Mes 10)					
	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Tratamiento	2	13,971	6,985	0,733	0,498
Bloque	1	7,862	7,862	0,8249	0,3791
Error experimental	14	133,424	9,53		
Error de muestreo	72	375,97	5,22		0,05092
Análisis de Varianza (Mes 11)					
	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Tratamiento	2	10,62	5,31	0,5924	0,5663
Bloque	1	24,128	24,128	2,6921	0,1231
Error experimental	14	125,477	8,963		
Error de muestreo	72	343,09	4,77		0,04321

ANEXO E. PRUEBA POST-ANOVA (PRUEBA DE TUKEY) PARA LAS PROPIEDADES AGRONÓMICAS DEL CULTIVO

- **Altura del tallo**

Prueba de Tukey (Mes 10)						
Tratamiento	Media	Diferencia		Inf	Sup	Criterio
T1	190,8566667	T1-T2	4,94333333	-9,44647788	19,3331445	no
T2	195,8	T1-T3	18,79	4,40018879	33,1798112	si
T3	172,066667	T2-T3	23,7333333	9,34352212	38,1231445	si

Prueba de Tukey (Mes 11)						
Tratamiento	Media	Diferencia		Inf	Sup	Criterio
T1	192,19	T1-T2	5,87666667	-8,68927534	20,4426087	no
T2	198,066667	T1-T3	20,1233333	5,55739132	34,6892753	si
T3	172,066667	T2-T3	26	11,434058	40,565942	si

- **Grosor del tallo**

Prueba de Tukey (Mes 4)						
Tratamiento	Media	Diferencia		Inf	Sup	Criterio
T1	1,52666667	T1-T2	-0,43	-0,70501515	-0,15498485	no
T2	1,09666667	T1-T3	0,42666667	0,15165152	0,70168182	si
T3	1,1	T2-T3	-0,00333333	-0,27834848	0,27168182	no

Prueba de Tukey (Mes 5)						
Tratamiento	Media	Diferencia		Inf	Sup	Criterio
T1	2,48666667	T1-T2	-0,56	-0,92851052	-0,19148948	no
T2	1,92666667	T1-T3	0,58	0,21148948	0,94851052	si
T3	1,90666667	T2-T3	0,02	-0,34851052	0,38851052	si

Prueba de Tukey (Mes 6)						
Tratamiento	Media	Diferencia		Inf	Sup	Criterio
T1	2,83	T1-T2	-0,26666667	-0,58056686	0,04723353	no
T2	2,56333333	T1-T3	0,46333333	0,14943314	0,77723353	si
T3	2,36666667	T2-T3	0,19666667	-0,11723353	0,51056686	si

- **Distancia entre nodos**

Prueba de Tukey (Mes 8)						
Tratamiento	Media		Diferencia	Inf	Sup	Criterio
T1	16,0266667	T1-T2	2,55	-1,00293306	6,10293306	no
T2	18,5766667	T1-T3	2,51333333	-1,03959973	6,06626639	no
T3	13,5133333	T2-T3	5,06333333	1,51040027	8,61626639	si
Prueba de Tukey (Mes 9)						
Tratamiento	Media		Diferencia	Inf	Sup	Criterio
T1	14,9166667	T1-T2	0,18333333	-1,45699184	1,8236585	no
T2	15,1	T1-T3	2,29666667	0,6563415	3,93699184	si
T3	12,62	T2-T3	2,48	0,83967483	4,12032517	si

ANEXO F. INFORME ANÁLISIS DE AGUA DE RIEGO PTAR-C

Resultados de la Solicitud de Análisis O2011-25



Laboratorio de Servicios Analíticos



Acreditado NTC-ISO/IEC 17025

Res. 26167 Septiembre 29 2006

Informe de Análisis de la Solicitud

Solicitante: Jorge Silva

Numero Serial: O2011-25

Numero de Muestras: 1

Procedencia: Cali- Universidad del Valle

Fecha de Muestreo: Ago 23 del 2011

Fecha de Entrega: Ago 24 del 2011

Fecha de Solicitud: Ago 25 del 2011

Entrega de Resultados: Sep 12 del 2011

Observaciones: Ptar.

No Muestra	Descripcion	pH (null)	K (mg/l)	Ca (mg/l)	Mg (mg/l)	Na (mg/l)	SO4 (mg/l)	B (mg/l)	CO3 (mg/l)	HCO3 (mg/l)	CE (mS)
	LDM	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	Agua de riego	7.20	7.84	19.74	9.19	63.91	0.31	0.04	0	9.20	375

Notas: 1. Los resultados presentes en este informe, se refieren unicamente a las muestras analizadas.

2. Este informe solo debe ser reproducido en forma total y con el visto bueno del Laboratorio.

3. Los resultados de los presentes análisis se obtuvieron en el Laboratorio a la temperatura 22 +/- 3 oC y humedad relativa 80 +/- 5 %

Los Límites de Detección del Método, LDM, están expresados en mg/l.

Laboratorio de Servicios Analíticos

Tel. 445-01-00

Ext. 3351 - 3678

Centro Internacional de Agricultura Tropical
Km. 17 recta Cali-Palmira

Página 1 de 2