



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Influencia de la aplicación de compost producido a partir de residuos de la caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.) en un Vertisol de Valle del Cauca

Isabel Cristina Ospina Barrero

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ciencias Agropecuarias
Palmira, Colombia

2016

Influencia de la aplicación de compost producido a partir de residuos de la caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.) en un Vertisol de Valle del Cauca

Isabel Cristina Ospina Barrero

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:

Magister en Ciencia Agrarias

Director:

Ph.D. Juan Carlos Menjivar Flores

Línea de Investigación:

Suelos

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ciencias Agropecuarias
Palmira, Colombia

2016

*Dedico este trabajo a:
Dios, la fuerza eterna y renovadora que me acompaña e ilumina mi camino, a mi
madre María Azucena Barrero, el ser más especial que conozco, que su ejemplo
siempre me acompaña y mi esposo Johannes Delgado, que con su amor, cariño y
compresión apoya mis sueños para ser una mejor mujer.*

Agradecimientos

Mi más sincera gratitud a las siguientes personas que colaboraron de una u otra forma en la elaboración de este trabajo. A:

Incauca S.A. por su apoyo económico y espacio de tiempo para estudiar.

Al profesor Juan Carlos Menjivar por ser el guía y amigo en el crecimiento académico e intelectual.

A mi familia por la paciencia al compartir el tiempo con el trabajo y el estudio.

A la Universidad Nacional de Colombia sede Palmira por el aporte en mi formación como profesional y persona.

Resumen

La finalidad de este trabajo fue conocer los cambios producidos en las propiedades físicas y químicas del suelo clasificado como Vertisol, ubicado en el sur de Jamundí en el departamento de Valle del Cauca y del crecimiento de cultivo de caña de azúcar, al incorporar compost obtenido de los residuos de la agroindustria azucarera (cachaza, ceniza, hojas y vinaza). Estos subproductos de la actividad productiva se han venido manejando de una manera ambientalmente amigable por medio de procesos de bioestabilización o compostaje en la planta del Ingenio del Cauca.

De acuerdo a estudios realizados por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) y el Centro de Investigación de la Caña de Azúcar (CENICAÑA), los Vertisoles ubicados en esta región se consideran de fertilidad moderada, sin embargo, son suelos superficiales, pobres a imperfectamente drenados que afectan las propiedades físicas y a su vez las propiedades químicas y biológicas, por lo tanto, es importante realizar aplicaciones de materia orgánica.

En la actualidad se realiza la práctica de aplicación de compost en las suertes del ingenio, se ha establecido una dosis de 20 t ha^{-1} y tiempo de madurez de 70 días, no obstante es necesario conocer cuáles son las condiciones óptimas para ser utilizadas en las labores agronómicas del cultivo de caña de azúcar en este tipo de suelo. Para esto, se diseñó un ensayo en donde se evaluaron diferentes tratamientos utilizando tres compost con diferentes estados de maduración (70, 95 y 120 días) y dos dosis por encima (30 y 40 t ha^{-1}) del valor que se utiliza actualmente y 1 por debajo de este valor (10 t ha^{-1}), realizando 4 repeticiones, durante un ciclo de crecimiento del cultivo.

Influencia de la aplicación de compost producido a partir de residuos de la caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L) en un Vertisol de Valle del Cauca

Se evaluaron las variables físicas de textura, estabilidad de agregados, densidad aparente y real, capacidad de campo y punto de marchitez en el suelo, en cuanto a las variables químicas se determinó el pH, conductividad eléctrica, materia orgánica, N, P, S, Ca, Mg, K, Na, Al, B, Fe, Cu, Mn y Zn para el suelo y elementos mayores y menores en tejido foliar. Para medir el crecimiento del cultivo se consideró población, altura y diámetro, para conocer la productividad se evaluó tonelada de caña de azúcar por hectárea (TCH) y tonelada de sacarosa por hectárea (TSH).

Los resultados obtenidos mostraron que la aplicación de compost, mejoró la resistencia del suelo a la acción de agua por el mayor aporte de materia orgánica, el grado de madurez del abono cambió el pH, aumentó el contenido de materia orgánica, Mn y Fe, la dosis más alta contribuyó a una mejor disponibilidad de K y P, por otra parte, la dosis más baja contribuyó a la disponibilidad de Mg y Na en el suelo. Los nutrientes que fueron extraídos por el cultivo y expresados en el tejido foliar fueron K, P, Na y Zn. Aunque se presentaron cambios significativos en las variables agronómicas de población, altura y diámetro, estos resultados no se reflejaron en TCH y TSH.

Palabras clave: Caña de azúcar, Compost, Residuos, Vertisol, Cachaza, Bagazo, Vinaza.

Abstract

The purpose of this study was to determine the changes in the physical and chemical properties of a soil Vertisol classified, located in southern Jamundí, department of Valle del Cauca and growth of cane cultivation, incorporating compost obtained from sugar industry waste (Cachaza, ash, leaves and stillage). These byproducts of productive activity have been driving in an environmentally friendly way by means of processes biostabilization or composting in the Incauca plant.

According to studies conducted by the Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) and the Research Center for Sugarcane (CENICAÑA), Vertisol soils located in this region are considered moderate fertility, however, are shallow soils, poor, and imperfectly drained affecting the physical, chemical, and biological properties, hence is important perform the organic matter applications.

Today the compost application practice in Incauca fields, it has established a dose of 20 t ha⁻¹ and maturity time of 70 days, however it is necessary to know what the optimal conditions for use in agronomic work cane cultivation in this soil type. For this, a test where different treatments using three compost with different ripening stages (70, 95, and 120 days) and two doses above (30 and 40 t ha⁻¹) of the value that is currently used and 1 below this value (10 t ha⁻¹), making 4 repetitions during one growth cycle of sugarcane.

Texture, aggregate stability, bulk and real density, field capacity and permanent wilting point in the soil were evaluated as to the chemical variables pH, electrical conductivity, organic matter in the soil were evaluated, and N, P, S, Ca, Mg, K, Na, Al, B, Fe, Cu, Mn and Zn for soil and major and minor elements in foliar tissue. To measure crop growth the population, height and diameter was considered, to measure productivity the tons of cane per hectare (TCH) and tons of sucrose per hectare (TSH) were evaluated.

Influencia de la aplicación de compost producido a partir de residuos de la caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L) en un Vertisol de Valle del Cauca

The results showed that compost application, improved soil resistance to the water action for the greatest contribution of organic matter, the degree of maturity of compost change the pH, increase the organic matter content, Mn and Fe, higher dose contributed to improved availability of K and P, and the lower dose contributed to improved availability of Mg and Na in the soil. The nutrients that were extracted by cultivation and expressed in leaf tissue were K, P, Na and Zn. Although significant changes occurred in the population, height and diameter of the crop, these results were not reflected in TCH and TSH.

Keywords: Sugarcane, Compost, Waste, Vertisol, Cachaza, bagasse, stillage.

Contenido

Resumen	VI
Objetivo general	6
Objetivos específicos	6
1. Marco Teórico	7
1.1 Compostaje	7
1.1.1 Definición	7
1.1.2 Etapas del proceso de compostaje	9
1.1.3 Beneficios de la aplicación de compost	14
1.2 Residuos del procesamiento de la caña de azúcar y alcohol carburante	15
1.2.1 Proceso producción de azúcar	16
1.2.2 Proceso producción de alcohol	19
1.2.3 Aplicación de compost en Colombia	21
1.3 Características de los Vertisoles	22
1.4 Efectos de la aplicación de compost en los Vertisoles	24
1.4.1 Propiedades físicas	24
1.4.2 Propiedades químicas	25
1.4.3 Propiedades biológicas	25
2. Materiales y métodos	27
2.1 Localización geográfica del ensayo	27
2.2 Descripción del Vertisol (<i>Chromic Endoaquerts</i>)	28
2.3 Diseño experimental	29
2.3.1 Descripción de los tratamientos	29
2.3.2 Descripción unidad experimental	31
2.3.3 Variables de respuesta	31
2.3.4 Análisis estadístico de la información	32
2.4 Técnicas de laboratorio utilizadas en la determinación de las variables de respuesta	32
2.4.1 Métodos físicos de suelos	32
2.4.1.1 Determinación de densidad aparente.	32
2.4.1.2 Determinación de densidad real.	32
2.4.1.3 Determinación de porosidad total.	32
2.4.1.4 Determinación de capacidad de campo.	33
2.4.1.5 Determinación de punto de marchitez.	33
2.4.1.6 Determinación de lámina de agua almacenable.	33
2.4.1.7 Determinación de textura	34
2.4.1.8 Determinación de estabilidad de agregados.	34
2.4.1.9 Determinación del índice de estabilidad.	34
2.4.2 Métodos químicos de suelos	35
2.4.2.1 Determinación de pH	35
2.4.2.2 Determinación de conductividad eléctrica	35
2.4.2.3 Determinación de materia orgánica	35
2.4.2.4 Determinación de nitrógeno disponible	35
2.4.2.5 Determinación de la capacidad de intercambio catiónico (CIC) y bases intercambiables (Ca, Mg, Na y K)	36

2.4.2.6 Determinación de Fosforo	36
2.4.2.7 Determinación de Azufre	36
2.4.2.8 Determinación de aluminio intercambiable	36
2.4.2.9 Determinación de Boro.....	36
2.4.2.10 Determinación de Micronutrientes Cu, Fe, Mn y Zn.....	37
2.4.3 Métodos químicos en tejido foliar.	37
2.4.3.1 Determinación de clorofila.....	37
2.4.3.2 Determinación de nitrógeno	37
2.4.3.3 Determinación de Fosforo	38
2.4.3.4 Determinación de azufre.	38
2.4.3.5 Determinación de Ca, Mg, K y Na	38
2.4.3.6 Determinación de Boro.....	38
2.4.3.7 Determinación de Micronutrientes Cu, Fe, Mn y Zn.....	38
2.4.4 Métodos de evaluación agronómica del cultivo	39
2.4.4.1 Determinación de altura de tallo.....	39
2.4.4.2 Determinación de población del tallo.....	39
2.4.4.3 Determinación de diámetro del tallo	39
2.4.4.4 Determinación de Brix en jugo de caña de azúcar	39
2.4.4.5 Determinación de polarización en el jugo de caña de azúcar.	39
2.5 Montaje y conducción del experimento.....	40
3. Resultados y discusión	42
3.1 Calidad del compost generado de residuos de caña de azúcar	42
3.2 Efecto del compost en las propiedades físicas del suelo	46
3.2.1 Caracterización física de la suerte 19Z	46
3.2.2 Cambios en las variables físicas por efecto de la interacción edad*dosis del compost	48
3.3 Efecto del compost en las propiedades químicas del suelo	51
3.3.1 Caracterización química de la suerte 19Z	51
3.3.2 Cambios en las variables químicas por efecto de la edad del compost.....	53
3.3.3 Cambios en las variables químicas por efecto de la dosis del compost.....	54
3.3.4 Cambios en las variables químicas por efecto de la interacción edad*dosis del compost	60
3.4 Contenido de nutrientes a nivel foliar del cultivo de caña de azúcar	63
3.4.1 Extracción de nutrientes en el tejido foliar a los 3 meses	64
3.4.2 Extracción de nutrientes en el tejido foliar a los 6 meses	67
3.5 Efecto de la aplicación de compost sobre el crecimiento y la productividad del cultivo de caña de azúcar	70
3.5.1 Crecimiento del cultivo a los 3 y 6 meses.....	71
3.5.2 Productividad del cultivo de caña de azúcar.....	76
4. Conclusiones	80
Anexo A: Determinación de Boro en suelo, método propuesto por el laboratorio de campo Ingenio Providencia.....	81
Anexo B: Análisis de varianza de las variables estadísticamente significativas	82
5. Bibliografía	87

Lista de Tablas

Tabla 1. Descripción de los tratamientos evaluados.....	29
Tabla 2. Caracterización fisicoquímica de los compost, comparado frente a la.....	43
Tabla 3. Caracterización física del suelo <i>Chromic Endoaquerts</i> Horizonte Ap de la suerte 19Z	46
Tabla 4. Resumen del análisis de varianza para las propiedades físicas del suelo <i>Chromic Endoaquerts</i> Horizonte Ap de la suerte 19Z	48
Tabla 5. Resumen de las diferencias estadísticas en las variables de respuesta físicas del suelo <i>Chromic Endoaquerts</i> Horizonte Ap de la suerte 19Z.....	50
Tabla 6. Caracterización química del suelo <i>Chromic Endoaquerts</i> Horizonte Ap de la suerte 19Z	51
Tabla 7. Resumen del análisis de varianza para las propiedades químicas del suelo <i>Chromic Endoaquerts</i> Horizonte Ap de la suerte 19Z.....	52
Tabla 8. Resumen de las diferencias estadísticas de las variables de respuesta químicas del suelo <i>Chromic Endoaquerts</i> Horizonte Ap de la suerte 19Z.....	56
Tabla 9. Balance de bases del suelo <i>Chromic Endoaquerts</i>	57
Tabla 10. Análisis de varianza a nivel foliar de la variedad 01-1940 después de la aplicación compost.....	63
Tabla 11. Diferencias estadísticas en las variables de respuesta de crecimiento de la variedad 01-1940 a los 3 meses.....	65
Tabla 12. Diferencias estadísticas en las variables de respuesta de crecimiento de la variedad 01-1940 a los 6 meses.....	68
Tabla 13. Análisis de varianza para las variables de crecimiento y productividad de la variedad 01-1940 después de la aplicación compost	71
Tabla 14. Diferencias estadísticas en las variables de respuesta de crecimiento del cultivo y productividad de la variedad 01-1940	73

Lista de Figuras

Figura 1. Sucesión microbiana y ambiental durante el compostaje.	11
Figura 2. Reacciones bioquímicas durante el proceso de compostaje.	13
Figura 3. Diagrama proceso productivo del azúcar.	17
Figura 4. Diagrama proceso productivo del alcohol.	20
Figura 5 Ubicación de experimento: Colombia, departamento del Valle del Cauca, municipio Jamundí, hacienda Cachimbalito Norte, suerte 19Z.	27
Figura 6. Distribución espacial de las parcelas y los tratamientos de la suerte 19Z.....	30
Figura 7. Variación de la estabilidad de agregados (0,5 mm) después de la aplicación de compost del suelo <i>Chromic Endoaquerts</i> Horizonte Ap de la suerte 19Z	49
Figura 8. Variación de los contenidos de pH y MO después de la aplicación de compost del suelo <i>Chromic Endoaquerts</i> Horizonte Ap de la suerte 19Z	54
Figura 9. Variación de los contenidos de K, Na y Mg después de la aplicación de compost del suelo <i>Chromic Endoaquerts</i> Horizonte Ap de la suerte 19Z	55
Figura 10. Efectos de la aplicación de compost sobre la saturación de bases del suelo <i>Chromic Endoaquerts</i> Horizonte Ap de la suerte 19Z.....	58
Figura 11. Variación de los contenidos de P y S después de la aplicación de compost del suelo <i>Chromic Endoaquerts</i> Horizonte Ap de la suerte 19Z	60
Figura 12. Variación de los contenidos de Fe y Mn después de la aplicación de compost del suelo <i>Chromic Endoaquerts</i> Horizonte Ap de la suerte 19Z	62
Figura 13. Variación de los contenidos de Na a nivel foliar de la variedad 01-1940 después de la aplicación compost.....	64
Figura 14. Variación de los contenidos de Mn a nivel foliar de la variedad 01-1940 después de la aplicación compost.....	66
Figura 15. Variación de los contenidos de K y P a nivel foliar de la variedad 01-1940 después de la aplicación compost.....	69
Figura 16. Variación de los contenidos de Zn a nivel foliar de la variedad 01-1940 después de la aplicación compost.....	70
Figura 17. Comportamiento de las condiciones climáticas en el periodo de desarrollo de la variedad 01-1940	71
Figura 18. Variación en la población de la variedad 01-1940 después de la aplicación compost	74
Figura 19. Variación en la altura de la variedad 01-1940 después de la aplicación compost	75
Figura 20. Variación en el diámetro de la variedad 01-1940 después de la aplicación compost	76
Figura 21. TCH alcanzado por la variedad 01-1940 después de la aplicación compost ..	78
Figura 22. TSH alcanzado por la variedad 01-1940 después de la aplicación compost..	79

Introducción

En la actualidad se reporta que los suelos se han degradado a niveles críticos, siendo los fenómenos naturales y la actividad humana los responsables de estos cambios (García, 2010). En la naturaleza se conoce que hay ambientes que son propensos a sufrir efectos adversos con mayor rapidez como son pendientes fuertes, suelos frágiles, tierras secas o desérticas con drenaje rápido y excesivo, tierras bajas cercanas al mar, deslaves submarinos, regiones de precipitación intensa, o regiones con alto riesgo de sequía. Por otra parte, el desarrollo y el incremento de la presión demográfica dan como resultado la degradación del suelo considerado un efecto colateral e inevitable del desarrollo. Las causas de degradación son diversas y a menudo complejas, pero se acepta cada vez con mayor frecuencia que la tierra está dejando de ser productiva a una velocidad alarmante. A medida que una mayor población ha venido a depender de la agricultura sedentaria, más tierra es degradada; una estimación de la Unión Internacional de Conservación de la Naturaleza y los Recursos Naturales (IUCN, 1980), mostró que 450 millones de hectáreas de tierra arable y pastoreo han sido severamente degradadas en más o menos 7000 años, causando la extinción de mucha fauna y flora (García, 2010).

Resultados presentados por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) y Corpoica en 2002 sobre el uso de la tierra en Colombia, en el cual se observa que el 3,6% de este recurso es utilizado para la agricultura siendo los departamentos de Caribe y de Valle del Cauca que presentan alcalinidad y/o salinidad por hacer uso del suelo para agricultura intensiva.

Estas cifras se asocian con las pérdidas de materia orgánica como otra de las grandes amenazas para el suelo, porque con ellas no solo se ponen en muy serio riesgo sus funciones y su fertilidad, sino que también lo hace propenso a la erosión. En el Valle geográfico del río Cauca, observaciones realizadas indican que en los últimos 40 años se

ha perdido el 50% de la materia orgánica con contenidos actuales que oscilan alrededor de 1,5% en buena parte de los suelos (García, 2010).

Una de las prácticas utilizadas para mejorar las condiciones del suelo y aprovechar los residuos agrícolas es el proceso de compostaje, el arte del compostaje es muy antiguo y sus principios básicos han sido apreciados y usados a lo largo de los siglos, aunque con distinta intensidad según la situación económica y social de la época (Misra y col., 2003). En Colombia la práctica de compostaje ha avanzado en la última década, siendo ya reconocido este proceso a escala industrial, contando en diferentes regiones con plantas de tratamientos de residuos, principalmente de origen agrícola, con variaciones en materias primas, lo que depende de la zona y el cultivo.

En el valle geográfico del río Cauca se procesan los residuos de la industria azucarera y del alcohol carburante, existen seis plantas de compostaje ubicadas en los departamentos de Valle, Risaralda y Cauca, el procesamiento de residuos de caña de azúcar, superan las 24000 toneladas de compost por mes (Salamanca, 2012). Dentro de estas seis plantas la de mayor capacidad (8500 t) se encuentra ubicada en Incauca, creada aproximadamente hace doce años con el fin de tratar la vinaza, residuo de la producción del alcohol carburante, con material obtenido del procesamiento de los subproductos generados en la cosecha de la caña de azúcar y producción de azúcar, como son el bagazo, cachaza, ceniza y la hoja, obteniendo por medio del proceso bioxidativo, abono orgánico tanto para uso interno del ingenio, como para su comercialización.

El compost como acondicionador orgánico natural mejora a mediano y largo plazo las propiedades físicas, químicas y biológicas de los suelos, incrementa la porosidad, disminuye la densidad aparente, consolida la estructura y consistencia, aumenta la capacidad de intercambio catiónico, capacidad buffer, la concentración de algunos nutrientes esenciales y la actividad biológica del suelo (Labrador, 2001; Ward, 2002; Brady and Weil, 2004; Quiroz y Pérez, 2013).

El proceso de compostaje ha servido para retornar los nutrientes y materia orgánica que se extraen del suelo y remediar el grave deterioro de la fertilidad debido al agotamiento por la actividad agrícola, escasa rotación de cultivos y exceso de labranza, obteniendo como resultado productos transformados que se incorporan al ciclo productivo (Agilar y

cols., 1998), en consecuencia se ha modificado una de las prácticas que se utiliza convencionalmente para acondicionar las suertes del ingenio, la fertilización química, acompañándola con adición de compost, promoviendo esta práctica hacia la agricultura de conservación.

En el Valle del Cauca existen varios tipos de suelo, de acuerdo al estudio de suelo del IGAC y la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC), hay 84 series de suelo de los órdenes Mollisol, Inceptisol, Vertisol, Entisol, Anfisol y Ultisol, que corresponde respectivamente a los siguientes porcentajes, 36, 26, 21, 10, 5 y 1 del área total. (IGAC, 1980).

De este grupo de suelos mencionados el utilizado para este estudio fue un vertisol ubicado en el sur de Jamundí en la hacienda Cachimbalito Norte suerte 19Z, los suelos de esta zona, se caracterizan por ser aluviones muy finos; los suelos son superficiales, pobre a imperfectamente drenados y con características vérticas; la mayor parte de ellos están artificialmente drenados, mediante drenaje entubado y por lo tanto su profundidad efectiva ha pasado a ser moderada; poseen texturas muy finas, en algunos sectores se presentan inundaciones, localmente conocidas como de ascenso capilar; son de alta capacidad catiónica de cambio, de alta saturación de bases, la relación Calcio / Magnesio es estrecha en los primeros 60 cm e invertida en profundidad, el Fósforo disponible es bajo, la reacción varía de fuertemente ácida a ligeramente alcalina y la fertilidad moderada (IGAC - Cenicaña, 2003).

El objetivo del presente estudio fue evaluar el efecto de la aplicación de compost en diferentes estados de maduración y dosis, en las propiedades físicas y químicas del suelo escogido, además de la influencia en el crecimiento del cultivo de caña a los 3 y 6 meses y su productividad. Los alcances de esta investigación pretenden generar información del beneficio que está aportando el compost generado de la industria azucarera en este tipo de suelo, como el aporte de la aplicación adecuada de compost para obtener el mejor rendimiento del cultivo y mantener la sostenibilidad del suelo.

Objetivo general

Evaluar el efecto de la aplicación de compost producido a partir de residuos de la caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L) en un Vertisol de Valle del Cauca.

Objetivos específicos

- ✓ Evaluar la calidad del compost en función de las épocas o estados de maduración y su efecto en diferentes dosis sobre las propiedades físicas y químicas de un Vertisol de la zona plana de Jamundí en el Valle del Cauca.
- ✓ Determinar si hay correlación entre los nutrientes aplicados en las diferentes dosis de compost con el crecimiento del cultivo antes del corte.
- ✓ Evaluar la influencia de la aplicación de las diferentes dosis de compost en el rendimiento del cultivo (TCH) y producción de sacarosa (TAH).

1. Marco Teórico

1.1 Compostaje

1.1.1 Definición

El compostaje es un proceso biooxidativo controlado que permite la transformación de la materia orgánica fresca en humus, en menos tiempo, comparado con el ocurrido de forma espontánea en el suelo. En el interviene gran diversidad de microorganismos que requieren de humedad adecuada y sustratos orgánicos heterogéneos en su composición y homogéneos en cuanto a su tamaño. Para la degradación eficaz de la materia orgánica se debe proporcionar las condiciones fisicoquímicas adecuadas de humedad, temperatura, pH; y una buena relación C/N. Siendo la última condición la que más afecta este proceso, porque los microorganismos utilizan 30 partes de carbono por una de nitrógeno por esto se considera que el intervalo de C/N teóricamente óptimo es de 25-30, si el valor se encuentra fuera de este rango, afecta la velocidad del proceso, por consiguiente, cuando la relación es mayor a 40 la actividad biológica disminuye y los microorganismos deben oxidar el exceso de carbono con la consiguiente ralentización del proceso debido a la deficiente disponibilidad del nitrógeno para la síntesis proteica; en el caso contrario el proceso es rápido pero el exceso de nitrógeno se desprende en forma amoniacal, produciéndose una autorregulación de la relación C/N (Moreno, *et al.*, 2008).

El aumento de la temperatura es el mejor indicador de la actividad microbiana en un proceso de compostaje aeróbico. En el proceso se presentan básicamente dos estados de temperatura: en la primera etapa el material se encuentra en una fase mesófila donde el rango de temperatura se sitúa entre los 45 a 50 °C. La actividad metabólica de las bacterias mesófilas es de carácter exotérmico por lo que la temperatura va aumentando y se generan las sucesiones microbiológicas apareciendo así las bacterias termófilas que

irán aumentando también la temperatura del material llevándolo entre los 51 y 73°C hasta llevar el material a un grado de descomposición, posteriormente la temperatura desciende hasta llegar nuevamente a una fase mesófila donde las poblaciones que predominan son los hongos que transforman los compuestos de carbono de difícil degradación.

El pH influye en el proceso de compostaje a causa de su acción sobre los microorganismos. El pH inicial del proceso dependerá del tipo de residuo o mezcla a compostar, y generalmente, a lo largo del proceso manifiesta una progresiva alcalinización del medio.

El producto final debe ser un producto estable con un alto valor agronómico, homogéneo y fino de color café oscuro, desmenuzable, y debe poseer olor a tierra con diversidad en microbiota benéfica, por tratarse de un producto natural no tiene una composición química constante, sin embargo, se puede hablar de dos fracciones representativas, la fracción inorgánica y orgánica.

La primera corresponde a los minerales formados después de la transformación de la materia orgánica; cuando la materia orgánica es fresca, los microorganismos implicados en el compostaje necesitan de una serie de nutrientes específicos que se encuentren en forma química disponible y en concentraciones adecuadas. Los macronutrientes son el carbono, nitrógeno, fósforo y potasio. El C es utilizado como fuente principal de energía y junto con el N contribuye a la síntesis de proteínas y el crecimiento microbiano. El P y el K son esenciales a nivel metabólico y al igual que el C y el N durante el proceso de división celular. Otros micronutrientes o elementos traza, utilizados por los microorganismos en cantidades mínimas, como el boro, calcio, cloro, cobalto, cobre, hierro, magnesio, manganeso, molibdeno, selenio, sodio y zinc, son importantes para llevar a cabo la asimilación correcta del resto de nutrientes (Moreno, *et al.*, 2008).

La fracción orgánica en el proceso de compostaje está compuesta por organismos vivos y restos no descompuestos, parcialmente y completamente descompuestos. La materia orgánica es la terminología usada para referirse más específicamente a los componentes no vivos, siendo una mezcla heterogénea compuesta de un gran número de productos resultantes de las transformaciones químicas y microbianas de los desechos orgánicos.

Esta transformación se conoce como “proceso de humificación”, originando el humus, el cual posee resistencia al ataque posterior de microorganismos.

Otro compuesto importante son las ligninas, polímero mixto de diferentes derivados del fenilpropano, el cual constituye entre el 10 y 20 por ciento del tejido de la planta, hacen que estén más rígidas, cementando las fibras de celulosa. Son moléculas rígidas que resisten la descomposición y originan la mayor parte del humus.

Igualmente, las proteínas que forman una cadena larga de compuestos más simples que contienen nitrógeno llamados aminoácidos. Estos son también compuestos de cadenas cortas de carbono con átomos de nitrógeno y a veces átomos de azufre. Las proteínas al descomponerse se convierten en parte del humus, suministrando la mayor parte del nitrógeno presente en esta materia orgánica transformada (Moreno, *et al.*, 2008).

1.1.2 Etapas del proceso de compostaje

La descomposición de la materia orgánica biodegradable es el resultado de varios procesos que actúan simultáneamente, como la mineralización y la humificación microbiana de la lignina, celulosa y otros compuestos cuyo C y N son progresivamente mineralizados e inmovilizados (Coûteaux *et al.*, 1995). Se puede distinguir tres fracciones principales respecto a la composición química y a la calidad de la materia orgánica, una de fácil degradación, soluble, que se pierde rápidamente, otra insoluble, pero fácilmente degradable, que se compone principalmente de celulosa y hemicelulosa y una tercera que persiste durante el tiempo y está compuesta principalmente por ceras, lípidos, ligninas y carbohidratos lignificados (Heal *et al.*, 1997)

En la primera etapa del proceso de compostaje los microorganismos quimioheterótrofos utilizan los sustratos orgánicos como fuente de carbono y de energía en presencia de oxígeno, a través distintas rutas metabólicas que convergen en el ciclo de Krebs, donde se generan cantidades importantes de adenosín trifosfato ATP (Moreno, *et al.*, 2008). Siendo las bacterias, el grupo más importante de microorganismos, convirtiendo los polímeros en compuestos más sencillos (catabolismo) y utilizando estos sustratos para su crecimiento y duplicación (Kalil, 2007). Parte de la energía generada se disipa en forma de calor, la otra parte queda atrapada en el material, al incrementarse la

temperatura dentro de ciertos niveles se aceleran las actividades metabólicas microbianas propiciando la generación de más calor. La temperatura continúa incrementándose hasta que los niveles térmicos alcanzados son nocivos para la viabilidad de la mayoría de microorganismos, lo cual ocurre a partir de los 60°C. A dicha temperatura solo sobreviven algunas bacterias cuya actividad metabólica no permite mantener los niveles de temperatura, y como consecuencia, empieza la fase de enfriamiento (Moreno, *et al.*, 2008). Las fluctuaciones de temperatura provocan la sucesión en el tiempo de distintas poblaciones microbianas mesofilas y termófilas.

Estos residuos son degradados y despolimerizados por vía biológica hasta los componentes elementales básicos: proteínas, hidratos de carbono, ácidos orgánicos complejos, etc. Parte de estos compuestos sufren, un proceso de mineralización primaria, donde se forman compuestos inorgánicos solubles (NO_3^- , SO_4^{2-} , PO_4^{3-} , etc.) o bien gaseosos (CO_2 y NH_4^+). Algunos de estos compuestos son reorganizados en un proceso inverso denominado inmovilización temporal de nutrientes (fundamentalmente el nitrógeno) en la biomasa microbiana, pero se reincorporan más adelante a los compuestos húmicos (Labrador, 2002).

En la segunda etapa la materia orgánica que no se mineraliza en la primera etapa, es sometida a complejas reacciones bioquímicas y químicas, de resíntesis y polimerización que darán lugar a nuevos productos que reciben el nombre de sustancias húmicas. Además, otros compuestos materiales más resistentes como la lignina se van degradando lentamente y transformando en compuestos húmicos (Tomati y col., 2000; Castaldi y col., 2005); generalmente este cambio no finaliza durante el tiempo que dura el compostaje. Los microorganismos que realizan esta degradación son los hongos que crecen a menores temperaturas (Moreno, *et al.*, 2008); por otra parte, algunos compuestos procedentes de la materia orgánica son utilizados por los microorganismos para formar tejidos y otros son transformadores de CO_2 y H_2O .

La velocidad de transformación de la materia orgánica depende de la naturaleza física y química, de los microorganismos que intervienen y las condiciones físico-químicas del proceso (humedad, aireación, temperatura y pH) (Michel y col., 2004).

En la figura 1 se observan las sucesiones de microorganismos que intervienen el proceso de compostaje.

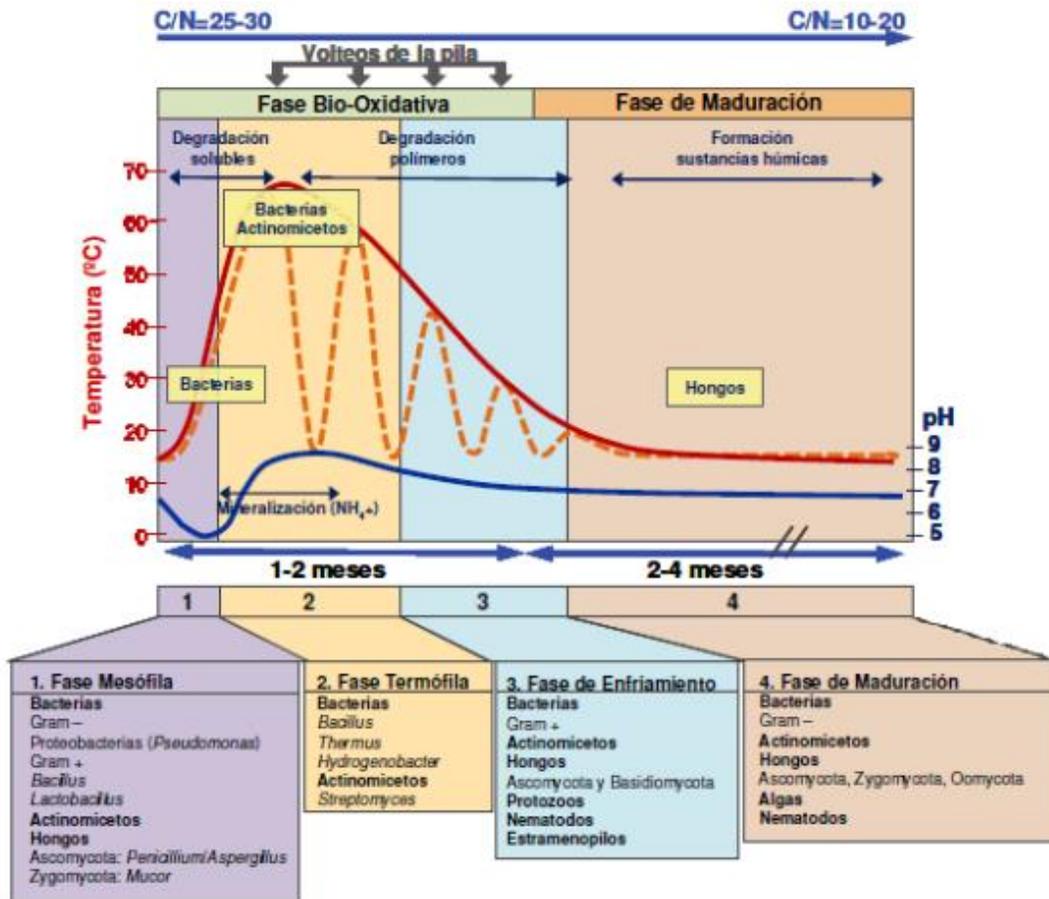


Figura 1. Sucesión microbiana y ambiental durante el compostaje.

Fuente: Moreno y Moran, 2008

La mayoría de microorganismos utilizan una serie de macro y micronutrientes en formas químicas sencillas. Estos nutrientes esenciales deben encontrarse en las formas químicas que son utilizables por los microorganismos para ser biotransformados y de ahí ser usados por diversas enzimas intracelulares en el crecimiento celular y como consecuencia en el incremento de la biomasa.

Los polímeros de origen vegetal o animal son la fuente de nutrientes que son degradados por una serie de enzimas extracelulares, secretadas al medio externo, catalizando la hidrólisis de celulosa, hemicelulosa, lignina y proteína.

La degradación de la celulosa está catalizada por las celulasas, que en realidad constituyen un sistema enzimático complejo, que catalizan diversas transformaciones durante la hidrólisis del polímero. Se han descrito tres tipos mayoritarios de actividades enzimáticas en este complejo: endoglucanasas, exoglucanasas y β -glucosidasas. Las endoglucanasas cortan internamente las cadenas de celulosa en diferentes sitios produciendo oligosacáridos de diferentes tamaños. Las exoglucanasas producen una liberación progresiva de glucosa o celobiosa. La degradación de la celobiosa y otros oligómeros relativamente pequeños a glucosa es catalizada por las β -glucosidasas (Moreno, *et al.*, 2008).

Aunque las hemicelulosas no tienen relación estructural con la celulosa, ya que son polisacáridos compuestos de diversas combinaciones de pentosas como la xilosa y arabinosa, de hexosas como la manosa, glucosa y galactosa y/o ácidos urónicos; su degradación ocurre de una manera similar a la de la celulosa, mediante la participación de endoenzimas que rompen enlaces dentro de los polímeros.

La biodegradación de la lignina es un proceso de oxidación complejo, indirecto y al azar. Este proceso no está completamente aclarado, y en el caso de *Phanerochaete chrysosporium*, que es el mejor conocido, se producen agentes oxidantes como el anión superóxido, el peróxido de hidrogeno, radicales hidroxilo (Rojas, *et al.*, 2011). Estos oxidantes rompen enlaces entre diferentes subunidades de fenilpropano constituyentes de la lignina, y causan despolimerización gradual de la misma. La despolimerización de la lignina produce gran variedad de fenoles, ácidos y alcoholes aromáticos, algunos de los cuales se mineralizan, y otros, particularmente los intermediarios fenolicos, son el origen de los compuestos húmicos.

Las proteínas son degradadas por proteasas y peptidasas que cortan en diferentes enlaces peptídicos produciendo aminoácidos, que pueden ser utilizados directamente o transformados, y que junto con los nitratos y amonio presentes o procedentes de los procesos de nitrificación o amonificación, son la fuente fundamental de compuestos nitrogenados (Moreno, *et al.*, 2008).

El éxito del compostaje depende de la presencia de los microorganismos productores de enzimas apropiadas para cada caso y como actualmente se ha aceptado que más del

80% del total de los microorganismos son desconocidos, reacciones producidas por especie microbianas identificadas como desconocidas, participan en el compostaje.

En la figura 2 se observan las reacciones bioquímicas que ocurren en el proceso descrito anteriormente.

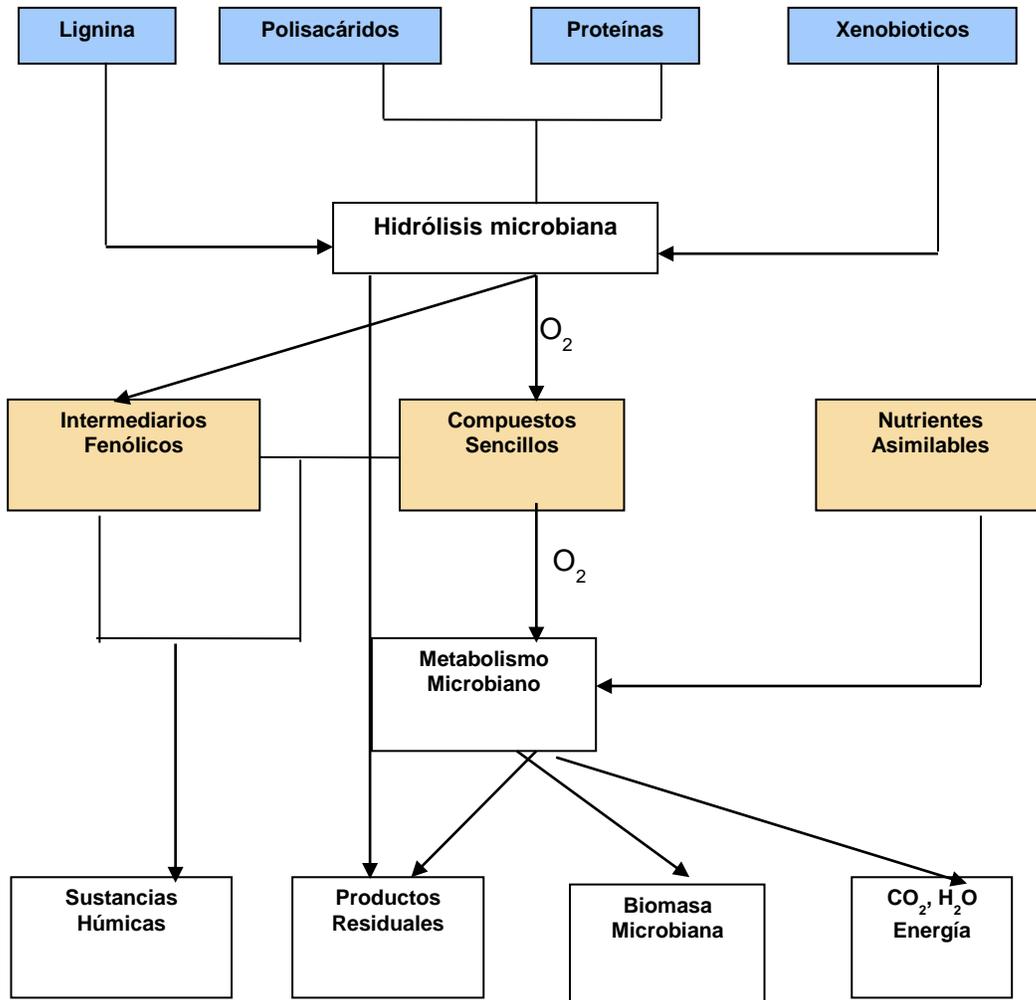


Figura 2. Reacciones bioquímicas durante el proceso de compostaje.

1.1.3 Beneficios de la aplicación de compost

Los residuos de la agroindustria azucarera y sus posibles aprovechamientos es un tema de actualidad en las zonas cañeras las cuales deben ajustarse a las nuevas normativas ambientales, así como diversificar y adaptar sus sistemas de producción. Se pueden plantear usos alternativos de los residuos, entre ellos la necesidad de investigar y proponer la metodología de compostaje como una herramienta fundamental para enfrentar esta situación, así como el aprovechamiento en procesos biotecnológicos (Basanta *et al.*, 2007)

Además de ser este proceso un beneficio para el aprovechamiento de residuos, se ha convertido para la industria azucarera en una forma de devolver la materia orgánica (MO) y los nutrientes al suelo.

Cada tipo de suelo debe tener, desde el punto de vista agronómico, un determinado nivel en MO en función de las condiciones climáticas, para mantener una fertilidad y productividad determinadas. Se han propuesto contenidos entre 2,5 y 3% de MO para suelos agrícolas.

De acuerdo a investigaciones realizadas sobre vinaza compostada con residuos orgánicos, se ha presentado buenos resultados en las propiedades del suelo. Este residuo se caracteriza por alto contenido de MO, N y K, que al aplicarse directamente en altas concentraciones se estaría llevando al suelo alto contenido de sales, este problema se ha mejorado con la transformación de este residuo en compost (Tejada *et al.*, 2006).

Resultados de aplicación de compost obtenido a partir de los residuos de azúcar de remolacha ha tenido un efecto positivo en el incremento de la materia orgánica, aportando sustancias húmicas, nitrógeno y mejorando la capacidad de intercambio catiónico. A pesar de la moderadamente alta salinidad y el contenido de sodio del compost, no se observó salinización o sodificación en el suelo (Madejón *et al.*, 2001).

Además las propiedades físicas se mejoran con el incremento de MO, debido a promover la floculación de las partículas minerales, el cual es una condición esencial para la agregación de las partículas del suelo. Entonces la densidad aparente disminuye como

resultado de la dilución de la densidad en la fracción mineral del suelo y se incrementa la aireación en el suelo acompañada de mayor porosidad y estabilidad estructural. El compost es el alimento de una multitud de microorganismos y favorece procesos de mineralización, el desarrollo de la cubierta vegetal y estimula el crecimiento de la planta en un sistema ecológico equilibrado.

Algunos efectos después de aplicar cachaza y vinazas son que la cachaza favorece el número y longitud de las raíces de la caña de azúcar, el área de exploración de la raíz, diámetro del tallo y la absorción de N y K (Villanueva *et al.* 1998). Asimismo, Tenorio *et al.* (2000) encontraron tasas de mineralización alta con dosis de cachaza (10 y 20 t ha⁻¹).

Para corregir la falta de nutrientes en el suelo se utilizan normalmente fertilizantes. Sin embargo, algunos fertilizantes nitrogenados causan acidez (sulfato de amonio) en el suelo y contaminación del agua por nitratos y nitritos (Galaviz *et al.*, 2010). Otra opción es el uso de abonos de origen animal y vegetal, los cuales permiten el aporte de materia orgánica, que actúa como un depósito de nutrientes que se suministran en forma lenta y regular a las plantas en crecimiento (Salgado *et al.*, 2006).

Resultados de investigaciones realizadas para conocer el efecto de la aplicación de enmiendas en el rendimiento del cultivo, manifiestan el incremento del rendimiento, sin embargo, se requiere adicionar fertilizante para obtener lo esperado.

La fertilización química y su combinación con biofertilizante proporcionan la mejor respuesta a las variables vegetativas y de respuesta del cultivo, lo que demuestra el efecto benéfico del compost, preparado a partir de los residuos agroindustriales de la caña de azúcar.

1.2 Residuos del procesamiento de la caña de azúcar y alcohol carburante

En la obtención de azúcar y alcohol se generan residuos que Incauca utiliza para generar abono orgánico en la planta de compostaje, los residuos que se originan en el campo durante el corte y el alce de la caña de azúcar se denominan residuos de campo, en su mayoría hojas y en menor cantidad cogollos, churquines y paja. Los de fábrica generados

durante el proceso industrial son en conjunto el bagazo y la cachaza. Algunos de estos residuos pueden originar otros como sucede con el bagazo que al ser usado como combustible de las calderas da lugar a las cenizas y con las mieles finales (melaza) que al utilizarlas en la destilería se obtiene la vinaza.

1.2.1 Proceso producción de azúcar

La obtención del azúcar en la fábrica tiene como fase inicial, el muestreo, pesaje y lavado de la caña de azúcar. Luego el material vegetal pasa a las picadoras y después a los molinos. Parte del bagazo resultante de la molienda se emplea en las calderas para la producción del vapor que es la base para generar la energía que se requiere para la realización del proceso, el bagazo sobrante se vende a las industrias del papel.

Posteriormente, el jugo obtenido en los molinos es pesado y calentado. Una vez caliente se somete a un proceso de clarificación y filtración para separar los materiales diferentes a la sacarosa que se encuentran en el jugo; en este paso se obtiene la cachaza. El jugo depurado es evaporado obteniéndose la meladura o jarabe que es conducida a los tachos, donde se procede a la cristalización para obtener una masa cocida, que pasa luego a la centrifugación, separándose el azúcar de la miel (Figura 3). En la producción del alcohol carburante, se utiliza parte del jugo claro, la miel final y la meladura.

Figura 3. Diagrama proceso productivo del azúcar.

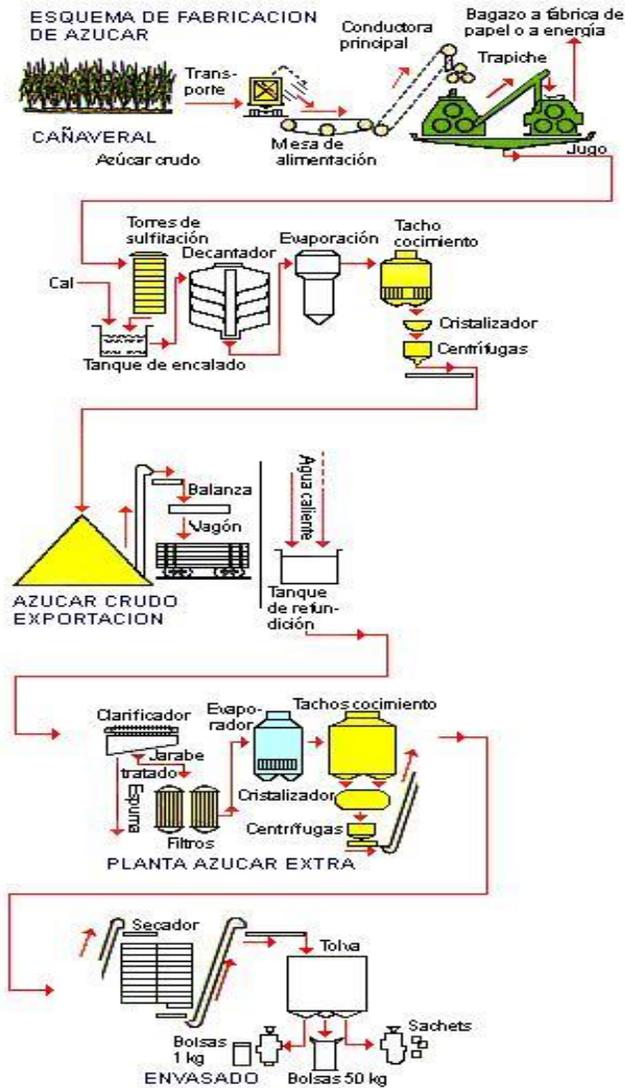


Figura 3. Diagrama proceso productivo del azúcar.

Fuente: Villegas, 2007.

1.2.1.1 Bagazo

Es el subproducto fibroso procedente de los tallos limpios de caña de azúcar después de someterlos al proceso de extracción del jugo en los molinos de la fábrica. El bagazo se utiliza principalmente como combustible en las calderas durante el proceso de fabricación de azúcar; el valor calórico del bagazo seco es alto, equivalente a 3.700 Btu/Lb. El bagazo está constituido físicamente por cuatro fracciones: fibra 45%, sólidos no solubles

2 – 3%, sólidos solubles 2 – 3% y agua 48 – 50%. La fibra corresponde a la fracción orgánica sólida insoluble en agua. Es materia prima en la fabricación de celulosa, papel y tableros. Los sólidos no solubles son de naturaleza inorgánica, compuestos fundamentalmente por tierra, piedras y otras materias extrañas; en su composición influyen el corte y la recolección de los tallos. Los sólidos solubles corresponden a la sacarosa, azúcares reductores y ceras que se encuentran en menor proporción.

Desde el punto de vista químico, el bagazo está compuesto de celulosa, hemicelulosa y lignina como principales polímeros naturales, además presenta pequeñas cantidades de otros compuestos clasificados como extraños (Basanta *et al.*, 2007).

Este residuo se utiliza en el proceso de compostaje para obtener un adecuado balance en la relación C:N, ayudando a potencializar y acelerar el proceso de descomposición; la cantidad de bagazo que entra a la planta es de 50 t/día.

1.2.1.2 Cachaza

La cachaza es el residuo o torta que se elimina en la clarificación del jugo de caña de azúcar durante la fabricación de azúcar. Es un material oscuro constituido por una mezcla de fibras de caña de azúcar, coloides coagulados incluyendo la cera, albuminoides, fosfatos de calcio y partículas de suelo.

Entre los componentes de la cachaza fresca que sobresalen está la materia orgánica, el Ca, P y N (Basanta *et al.*, 2007).

Este residuo aporta al proceso de compostaje el material celulósico degradable, necesario para el crecimiento de los microorganismos. El nitrógeno de este componente sirve como fuente de proteína para el soporte estructural de los microorganismos. Cabe anotar que los microorganismos utilizados en el proceso de compostaje son nativos y provienen de este material, procedentes del campo. Usualmente ingresa a la Planta de Compostaje 360 t/día.

1.2.1.3 Ceniza de bagazo

Es el residuo generado durante la combustión de bagazo en las calderas 1, 2 y 3 de la fábrica. Es cargado en volquetas y llevado a las tolvas de almacenamiento de cenizas ubicadas en las instalaciones de la fábrica. Su naturaleza es vegetal y mineral, y constituye una fuente útil de microelementos y además es un buen modificador de acidez en el proceso de compostaje. A la planta de compostaje ingresan normalmente 70 t/día.

1.2.1.4 Residuo de mesa cinco (RM5)

Los residuos de campo correspondiente a las hojas y tallos de la caña de azúcar que se recogen en la mesa de picado de caña, son transportados a la planta de compostaje en tractor. Las hojas aportan materia orgánica en forma de celulosa y hemicelulosa, el tallo aporta agua, azúcares, celulosa, hemicelulosa y lignina. La cantidad de RM5 que entra a la planta es de 70 t/día.

1.2.2 Proceso producción de alcohol

En la producción de alcohol se utiliza la mezcla mencionada junto con microorganismos conocidos como levaduras, especialmente la *Sacharomyces cerevisiae* que convierte las moléculas de azúcar en etanol, gas carbónico y otros subproductos en un periodo de 24 horas (Figura 4).

El líquido denominado vino o mosto es destilado en columnas de destilación fraccionada para separar el etanol. Generalmente se siguen dos o tres pasos de destilación, dependiendo de la pureza requerida del etanol. El primer paso de destilación, es denominado despojamiento, en él se separa el etanol de los sólidos remanentes de la fermentación (orgánicos e inorgánicos, solubles e insolubles) generando una solución de etanol agua al 50% v/v y un residuo que sale por el fondo de la columna, denominado vinaza. En el segundo paso denominado rectificación se genera etanol en el punto azeótropo de la mezcla, a 96.5% v/v, de la solución de etanol al 50% v/v, retirando las flemazas, impurezas volátiles que contaminan el etanol. En el tercer paso se obtiene

alcohol anhidro al 99.999 % v/v por deshidratación con zeolitas activadas que atrapan el agua (Villegas, 2007).

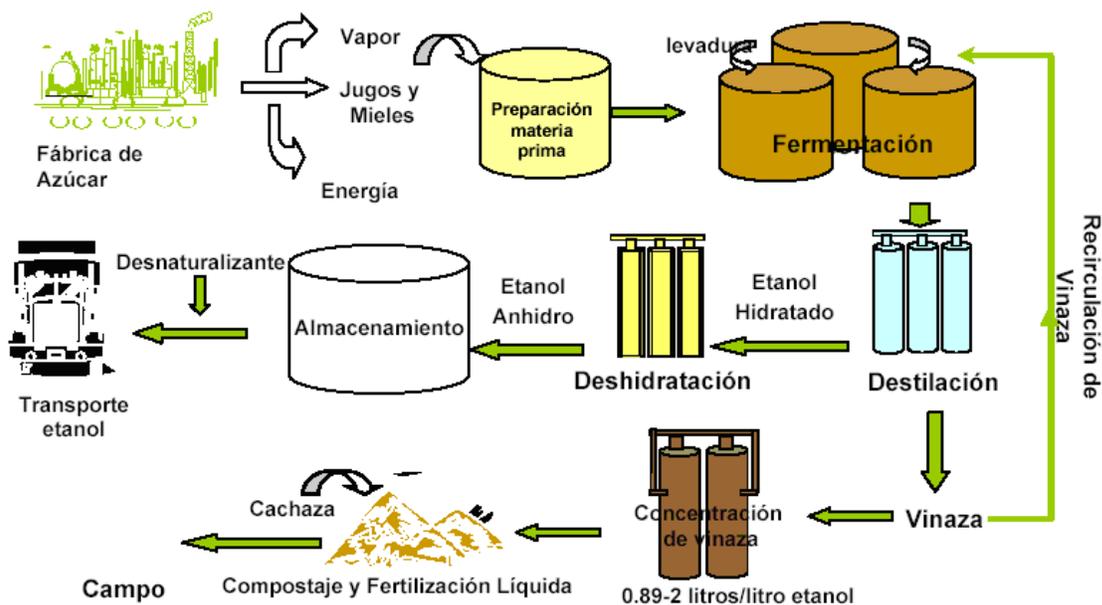


Figura 4. Diagrama proceso productivo del alcohol.

Fuente: Villegas, 2007.

Los subproductos obtenidos del procesamiento de la caña de azúcar (cachaza, bagazo y ceniza) y el alcohol (vinaza), junto con la hoja picada subproducto de cosecha son la materia prima en la producción de abono orgánico.

1.2.2.1 Vinaza

Las destilerías convencionales producen alrededor de 10 litros de vinaza por litro de alcohol anhidro. Para lograr manejar estos grandes volúmenes en el Ingenio del Cauca se instaló un sistema, donde el 70% de la vinaza producida se recicla a la sección de fermentación y el restante 30% se envía a dos evaporadores de circulación forzada en serie llamados Flubex, los cuales trabajan al vacío. Al primer evaporador ingresa vinaza con una concentración de sólidos del 10%, logrando una proporción de 2 litros por cada litro de alcohol fabricado; al salir del segundo efecto la vinaza tiene una concentración

entre 18 – 22% en sólidos y se envía a la planta de compostaje para producir abono orgánico.

Este residuo presenta como principales componentes químicos a la materia orgánica, el K, S y Ca. Sin embargo, su composición varía según provenga de melaza, mosto de jugo o mosto mixto, observándose mayores concentraciones de los principales componentes químicos en la vinaza procedente de la melaza. La cantidad de vinaza que entra a la planta es de 150 t/día.

1.2.3 Aplicación de compost en Colombia

El aumento del volumen de desechos sólidos industriales, agrícolas y domésticos conlleva una serie de implicaciones relacionadas con aspectos de salubridad y medioambientales que son objeto de preocupación para las investigaciones en materia de ecología y medioambiente.

Oviedo, et al. (2012) encontró que el compost ha sido una alternativa para mitigar el impacto negativo con la producción de residuos sólidos, fue identificado desde la década de 1970 los efectos adversos en la salud y medio ambiente por la generación, separación en la fuente, transporte, almacenamiento, tratamiento, eliminación e inadecuada disposición final de residuos municipales. Un estudio realizado en el 2002 por la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios presentó para 1086 municipios de Colombia que las formas más frecuentes para disponer residuos son los botaderos y quemas a cielo abierto (52%) y el relleno sanitario (30%).

En el país, la Política Nacional de Residuos Sólidos ubicó al aprovechamiento de residuos como una estrategia base en la jerarquía para la gestión de los residuos sólidos. En el caso de los residuos sólidos municipales, su aplicación formal se ha venido materializando a través de un programa cuyo funcionamiento se ha orientado hacia el aprovechamiento y valorización de la mayor cantidad posible de residuos.

En el caso particular del compostaje, en 2007 se encontró que 24 de 33 programas de mitigación de residuos sólidos compostaban los biorresiduos. El tiempo de degradación de la materia orgánica es variable en cada planta, predominan procesos con mínimas

actividades de control, monitoreo y manejo de subproductos y se procesan en la mayoría de las plantas biorresiduos sin separación en la fuente. Investigaciones realizadas en países en desarrollo (Zurbrugg, 2005, Barreira, 2006; Ekelund y Nystrom, 2007; Marmolejo, 2011) muestra que el compostaje de biorresiduos no ha sido efectivo debido a aspectos como generación de productos que no cumplen los estándares de calidad. Las instalaciones no tienen información sobre la calidad fisicoquímica y microbiológica que garantice la inocuidad del producto, el cual, sin embargo, es utilizado por cultivadores sin conocer el riesgo sanitario que pueda representar.

Para la agroindustria el panorama es diferente, una de las ventajas de los desechos del sector azucarero es su naturaleza orgánica, su biodegradabilidad y su potencial de reutilización, además como se mencionó anteriormente el control de calidad que se realiza es estricto con el objetivo de obtener un compost de óptimas condiciones para su aplicación en las suertes del ingenio y su comercialización, debido a que no existe mejor alternativa que la utilización de todos los residuos orgánicos disponibles, estos pueden ser aprovechados para disminuir el proceso de degradación del suelo que se manifiesta en muchos casos a través de problemas de compactación, sellado superficial, salinización y erosión. Una gran parte de los estudios realizados sobre la preparación del compost y la aplicación a los cultivos se han centrado en los efectos sobre la fertilidad de los suelos y la calidad de los cultivos, sin embargo, es necesario llevar a cabo mas investigación acerca de la supervivencia de los patógenos en el compost y de los tratamientos para reducir los niveles de estos microorganismos.

De acuerdo a las investigaciones realizadas se ha encontrado que el compost es un elemento presente en la agricultura moderna y se considera esencial desde la perspectiva de la agricultura sostenible (Sequi, 1996; Guerra-Rodríguez *et al.*, 2001; 2003).

1.3 Características de los Vertisoles

El nombre Vertisol deriva del vocablo latín “vertere” que significa verter o revolver (Dudal *et al.*, 1988), haciendo alusión al efecto de batido y mezcla, al reciclado de material del suelo provocado por la presencia de arcillas hinchables; las cuales están afectadas por

los diferentes contenidos de humedad, que no solo se produce en las presiones y movimientos de los planos horizontal y vertical, sino también se produce en direcciones entre estos planos.

Son suelos que presentan 30% más de arcilla en todos los horizontes hasta una profundidad de 50 cm, caras de deslizamiento, agregados en forma de cuña y grietas que se abren y se cierran periódicamente. El contenido de arcilla puede ser hasta del 90%, en particular en Vertisoles que se originan del periodo piroclásticos. Además, éstos tienen cambios pronunciados en el volumen con la variación con el contenido de humedad y evidencias del movimiento del suelo en las caras de deslizamiento (Soil Survey Staff, 2003; IUSS Working Group WRB, 2006).

La relación entre la pérdida y aumento de humedad establece la formación de grietas en la superficie. Durante el periodo seco, se forman las grietas que poco a poco se van rellenando por la erosión natural. Durante el periodo de lluvias estas partículas que han caído dentro se hinchan y dan lugar a veces a la aparición del microrelieve (micro-lomas y micro-depresiones) en forma de gilgai; surgiendo muchos mecanismos para su génesis, pero el más acertado es el basado en la desigual inflamación y contracción del suelo (Hallsworth et al., 1969)

Respecto al contenido de materia orgánica no es muy alta, aunque se podría confundir debido al color oscuro de los suelos Vertisoles (Singh, 1954). Se ha encontrado en Vertisoles de la India que contienen materia orgánica menor o igual a 1% (Roy *et al.*, 1962), y en Vertisoles africanos varía entre 0,5 al 2% (Dual, 1965). En algunos suelos australianos, la cantidad de materia orgánica puede llegar al 6% en la superficie de regiones semiáridas (Williams *et al.*, 1977).

Debido al predominio habitual de arcilla tipo 2:1 en particular de fracción de 2 micras de tamaño, los Vertisoles poseen alta capacidad de intercambio catiónico (CIC). Valores comúnmente entre 30 y 80 cmol/kg de suelo seco. El porcentaje de bases es mayor al 50% y a veces cerca del 100% con los iones de calcio y magnesio ocupando el 90% de los sitios de cambio. El calcio es el catión más predominante con una variación del 52 al 85%. Le sigue el magnesio, que oscila entre 10 y 30% y por último el sodio, que por lo general representa menos del 20% de la CIC (Roy et al., 1962).

1.4 Efectos de la aplicación de compost en los Vertisoles

1.4.1 Propiedades físicas

La adición de enmiendas orgánicas en los suelos se convierte en una técnica de manejo sostenible para la mejora de las características hidrofísicas, con efectos demostrados a largo plazo en un amplio rango de texturas y condiciones de manejo (Moreno, *et al.*, 2008).

En suelos arcillosos la falta de MO provoca un aumento en la cohesión entre las partículas más finas. Uno de los principales factores que inciden negativamente en la productividad de estos suelos, son sus propiedades físicas, las que se caracterizan por una baja agregación y drenaje deficiente. El aporte de enmiendas orgánicas al suelo puede ayudar a conservar y fomentar la estructura, debido a que la MO es considerada como un agente activo que favorece la agregación a través de mecanismos físicos y químicos (Sánchez *et al.* 2005).

Ruiz (1996), sugirió que una labor importante para mejorar las propiedades de suelos compactados es el aporte de materiales orgánicos; con esto se busca mejorar la estructura y hacer más eficiente los flujos internos. Resultados similares obtuvieron Muñoz *et al.* (1990) y Ruiz (1996); quienes coincidieron en que la descomposición de la MO produce sustancias y aglutinantes microbianos que pueden ayudar a estabilizar la estructura del suelo, favoreciendo la porosidad y reduciendo la densidad aparente. En cuanto a la estabilidad de agregados en agua, mayores aportes de abono orgánico incrementan la estabilidad de los agregados, particularmente favoreciendo la formación de macroagregados >3,36mm. Esto concuerda con lo expuesto por Whalen *et al.* (2003) quienes señalaron que los agregados >4mm estables en agua se incrementaron cinco meses después de la aplicación de compost y el efecto se mantuvo después de dos años del aporte. Señalaron que el efecto es lineal con respecto al C orgánico del suelo y citan al compost como una fuente de C. Blair *et al.* (1997), evidenciaron que un indicativo de la degradación o transformación de los agregados es la disminución de su tamaño, la cual se correlaciona con un agotamiento del C, por lo que una recuperación en el nivel del C del suelo permite un incremento en los macroagregados.

1.4.2 Propiedades químicas

Los efectos de la materia orgánica propia del suelo y de la que se añade como enmienda orgánica, beneficia en diferentes propiedades químicas del mismo, como son: la capacidad de intercambio catiónico, la capacidad de amortiguación de compuestos contaminantes, la formación de compuestos complejos quelantes, la regulación del pH, la atenuación de gases efecto invernadero, etc., así como su papel como regulador y fuente de nutrientes. En este último aspecto, su influencia en la disponibilidad de N, P y algunos micronutrientes es de gran importancia en la productividad agraria (Moreno, *et al.*, 2008).

Solano *et al.*, 2012, obtuvieron que con la aplicación de compost elaborado con residuos de la agroindustria azucarera en un Vertisol; se produjo tendencia a un ligero incremento en el pH e incremento de la MO con las aplicaciones más altas (6 y 7.5 t ha⁻¹). Resultados similares fueron reportados por Paneque y Martínez (1992), en aplicaciones de cachaza como sustituto de los fertilizantes químicos en el cultivo de la caña de azúcar. Por su parte tanto CIC como la capacidad de cambio de las bases (CCB), se estimularon con los mayores niveles de compost aplicados, lo que puede deberse a la participación del humus en el complejo absorbente del suelo. El aumento de los índices CIC y CCB están en correspondencia con el aumento del calcio cambiante del suelo, ya que en el material estudiado la principal fuente es la cachaza y está en su proceso de mineralización y humificación aporta sustancias húmicas y bases como el calcio y potasio principalmente. Ruiz y Medina (1983), informan que, al aumentar la fracción húmica del suelo, se incrementan los grupos carboxilos, propiciado ello un aumento del valor CCB.

1.4.3 Propiedades biológicas

Es complejo establecer límites claros entre un ámbito, el estrictamente fisicoquímico y el biológico, sin embargo, y a pesar de las interrelaciones existentes, es posible diferenciar dos niveles en los que concretar los efectos de la aplicación de compost al suelo desde una perspectiva biológica. Por un lado, la influencia de las poblaciones microbianas y, lo que es más importante, las actividades enzimáticas que estas pueden ejecutar. Además del impacto que se ejerce sobre el crecimiento vegetal, tanto de forma directa como indirecta. Relacionado con ambos aspectos se puede considerar la acción fitosanitaria

que el compost puede desarrollar, ya que en gran medida está determinada por la presencia de especies microbianas capacitadas para actuar como agentes de control biológico y, obviamente, contribuye a incrementar la productividad de los cultivos al propiciar un entorno más saludable (Moreno, *et al.*, 2008).

El cambio en las poblaciones microbianas y actividad microbiana puede generar cambios en las propiedades químicas y físicas lo cual provee información e indican los disturbios en el suelo (Riches, *et al.*, 2013). Por otra parte, la actividad enzimática microbiana es propuesta como un indicador temprano y sensible al estrés en ecosistemas naturales y agrícolas y son un indicador de la productividad del suelo y actividad microbiana (Badiane, *et al.*, 2001). Este grupo de indicadores biológicos son la producción de CO₂, actividad deshidrogenasa, actividad fosfatasa acida, actividad ureasa y actividad β-glucosidasa.

El desprendimiento de CO₂ en la atmosfera edáfica, acidifica las soluciones del suelo y favorece la solubilización de compuestos minerales de baja solubilidad, con lo que asegura la disponibilidad para la planta de ciertos minerales que de otra forma serian inaccesibles (Labrador, 2002).

La materia orgánica actúa globalmente sobre los procesos fisiológicos y bioquímicos unidos al desarrollo vegetal.

Numerosos estudios demuestran que en los suelos activos encontramos una gran variedad de vitaminas –B6, B12, ácido pantoténico, riboflavina, biotina, etc., estimulantes naturales del crecimiento vegetal – auxinas, giberelinas, distintos ácidos orgánicos-, e incluso antibióticos –estreptomicina, penicilina, terramicina, etc., estos compuestos orgánicos de naturaleza individual, procedentes de la transformación de la actividad microbiana, son de una enorme importancia para las plantas.

Igualmente, las sustancias húmicas, en bajas concentraciones, ejercen acciones destacables sobre la rizogénesis, aumentando la permeabilidad de las membranas celulares, elevando la actividad de los fermentos sintetizables, así como el contenido de clorofila y la intensidad de la respiración, y, en general, activando de forma equilibrada el metabolismo del vegetal y paralelamente el metabolismo microbiano (Labrador, 2002).

2. Materiales y métodos

2.1 Localización geográfica del ensayo

El experimento se realizó en la hacienda Cachimbalito localizada en el departamento de Valle del Cauca, sur del municipio de Jamundí (76° 29' 4.58" W y 3° 9' 26.15" N), con temperatura promedio de 24°C y precipitación aproximada a los 2000 mm anuales. El suelo escogido fue un Chromic Endoaquerts (IGAG – Cenicaña, 2003) (Figura 5).



Figura 5 Ubicación de experimento: Colombia, departamento del Valle del Cauca, municipio Jamundí, hacienda Cachimbalito Norte, suerte 19Z.

Fuente: Cenicaña, 2013.

2.2 Descripción del Vertisol (*Chromic Endoaquerts*)

Debido a que una plantación de caña es muy extensa se divide en suertes o lotes, con el objetivo de asociar las labores de campo que se realizan y las productividades que se obtienen por corte. La investigación se realizó en la suerte 19Z ubicada en la consociación Río de Janeiro, que se localiza en la parte sur-oriental y nor-oriental de la hacienda. El relieve es plano a plano cóncavo, de pendientes 0-1%, clima ambiental cálido húmedo.

El material parental está constituido por aluviones muy finos que han originado suelos superficiales, pobre a imperfectamente drenados y con características vérticas; en la actualidad se encuentran artificialmente drenados mediante drenaje entubado y canales abiertos y profundos, por lo tanto, su profundidad efectiva ha pasado a ser moderada; poseen texturas muy finas y fertilidad moderada.

La Consociación está formada por los suelos Río de Janeiro clasificados como Chromic Endoaquerts, familia muy fina, mezclada, activa, isohipertérmica, representados por el perfil modal CC893.

Río de Janeiro es un suelo de alta capacidad catiónica de cambio cuyos sitios de intercambio están dominados por el Ca y Mg y en menor cantidad por el potasio y el sodio. Las bases totales son medias a altas, su saturación es alta y en algunos casos alcanzan el 100%. La relación Ca/Mg es estrecha en los primeros 60 cm e invertida en profundidad. La relación calcio más magnesio / potasio es media a alta; el contenido de carbono orgánico medio en los horizontes poco profundos y bajo en profundidad. El P disponible es bajo y el pH varía de 5.1 (reacción fuertemente ácida) a 7.8 (reacción ligeramente alcalina).

Las propiedades físicas indican que son suelos de texturas muy finas. La diferencia entre la retención de humedad a 33 kPa (capacidad de campo) y a 1500 kPa (punto de marchitez) determina que el agua disponible para las plantas es alta. La densidad aparente está entre 1.18 y 1.45 Mg m⁻³ y la densidad real entre 2.45 y 2.65 Mg m⁻³. Los valores de porosidad total fluctúan entre 44 y 53%, dominada por los microporos; los

macroporos ocupan entre el 6 y 16%; el índice de plasticidad es alto en todo el perfil. En verano o cuando el riego no es frecuente presentan abundantes grietas de 2 a 6 cm de ancho que penetran hasta 60 o 70 cm de profundidad.

Los resultados de los análisis mineralógicos de la fracción arcilla no muestran dominancia de especie mineralógica alguna, los minerales más frecuentes son la caolinita, montmorillonita, clorita y micas, con lo cual los suelos Río de Janeiro se califican como de mineralogía mezclada.

2.3 Diseño experimental

2.3.1 Descripción de los tratamientos

Se utilizó un diseño en bloques completos al azar en un arreglo factorial 3 x 5, con tres (3) edades y cinco (5) dosis para un total de 15 tratamientos y 4 repeticiones (Tabla 1).

Tabla 1. Descripción de los tratamientos evaluados.

Tratamiento	Dosis (T ha ⁻¹)	Edad (Días)
T1	0	70
T2	10	70
T3	20	70
T4	30	70
T5	40	70
T6	0	95
T7	10	95
T8	20	95
T9	30	95
T10	40	95
T11	0	120
T12	10	120
T13	20	120
T14	30	120
T15	40	120

La descripción de los tratamientos en campo incluye un testigo (sin compost), aplicación de compost que se utiliza actualmente en el ingenio (20 t ha⁻¹- testigo comercial), dos dosis de compost por encima del valor que se utiliza actualmente (30 y 40 t ha⁻¹) y 1 por debajo (10 t ha⁻¹). Otro factor evaluado es la edad del compost, el producto despachado a campo por la planta presenta una edad promedio de 70 días, se evaluó los efectos que se generan al incrementar la edad a 95 y 120 días (Figura 6).

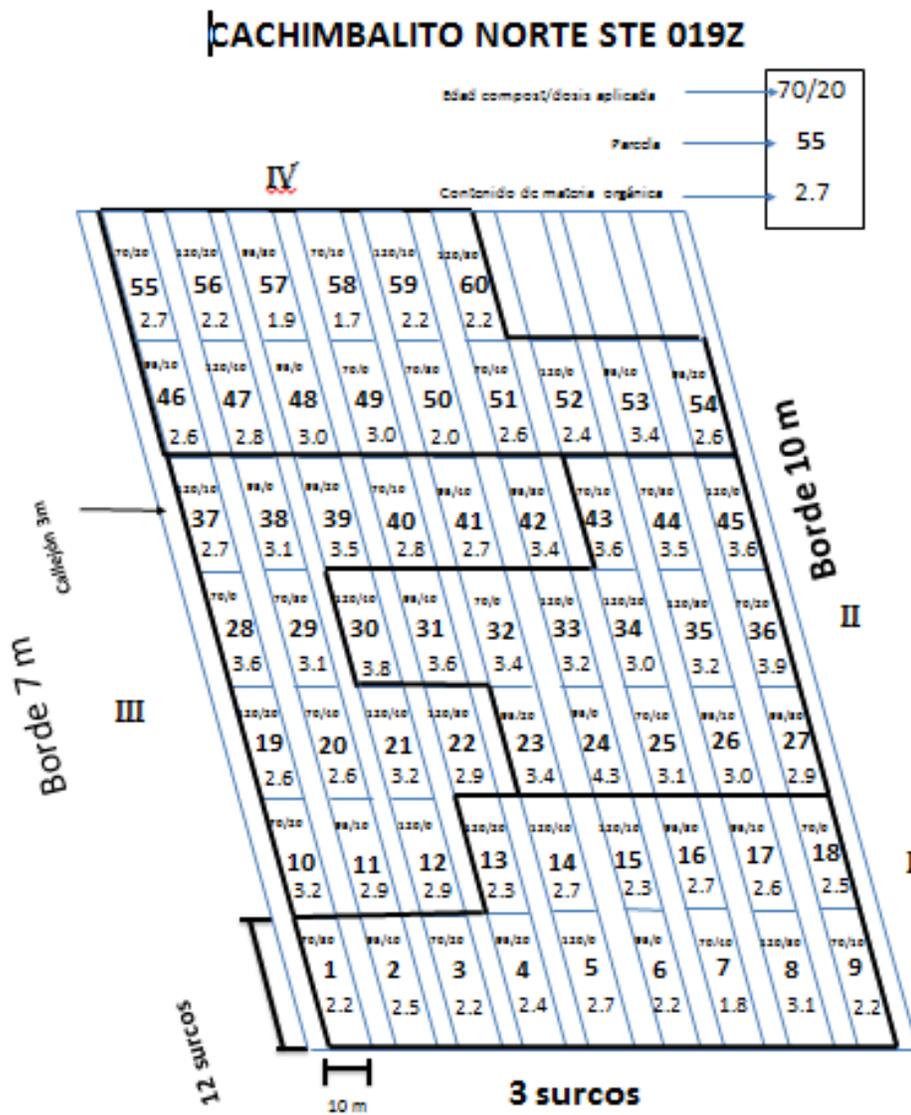


Figura 6. Distribución espacial de las parcelas y los tratamientos de la suerte 19Z.

2.3.2 Descripción unidad experimental

La unidad experimental utilizada fue la parcela, las dimensiones fueron 10 m de largo, 19,8 m de ancho, con doce surcos y la distancia entre surcos de 1,65 m, realizándose un muestreo aleatorio en zigzag en los surcos.

2.3.3 Variables de respuesta

	Densidad aparente
	Densidad real
	Porosidad total
Evaluación	Capacidad de campo
física del	Punto marchitez
suelo	Lámina de agua almacenable
	Textura
	Estabilidad de agregados
	Índice de estabilidad
	pH
	Conductividad Eléctrica
Evaluación	Materia orgánica
química del	Nitrógeno disponible
suelo	Capacidad de intercambio catiónico
	Contenido de calcio, magnesio, potasio, sodio, aluminio, fosforo y azufre
	Contenido de boro, cobre, hierro, manganeso y zinc
Evaluación	Clorofila
química del	Nitrógeno total
tejido foliar	Contenido de calcio, magnesio, potasio, sodio, fosforo y azufre.
	Contenido de boro, cobre, hierro, manganeso y zinc
Evaluación	Población
agronómica	Altura
tallos de	Clorofila
caña de	Brix
azúcar	Polarización

2.3.4 Análisis estadístico de la información

Las variables anteriormente descritas, evaluadas para diferentes fechas, fueron sometidas a un análisis de varianza (ANOVA) utilizando el software SAS versión 9.3 segunda edición 2006. Aquellas donde se detectaron diferencias significativas entre medias se sometieron a la prueba de promedios de Bonferroni. Tanto los Anova como las pruebas de Bonferroni se realizaron para los tratamientos, repeticiones y los tiempos de muestreo.

2.4 Técnicas de laboratorio utilizadas en la determinación de las variables de respuesta.

2.4.1 Métodos físicos de suelos

2.4.1.1 Determinación de densidad aparente.

Se tomaron muestras sin disturbar, utilizando un cilindro de 5 cm de altura por 5 cm de diámetro, la densidad aparente se determinó con la relación entre el peso y el volumen de un cilindro (Montenegro y Malagón, 1990).

2.4.1.2 Determinación de densidad real.

Para esta caracterización en el suelo el método más empleado es el del picnómetro, el cual consiste en determinar la masa y el volumen de lo sólidos del suelo a través de un frasco de volumen conocido (Montenegro y Malagón, 1990).

2.4.1.3 Determinación de porosidad total.

La porosidad de un suelo se define como la porción de su volumen no ocupado por partículas sólidas, se divide en macroporos y microporos, ella se estimó con base en las densidades real y aparente, según la relación (Montenegro y Malagón, 1990):

$$\eta = 1 - \left(\frac{dap}{dr}\right) * 100$$

Dap: Densidad aparente (g/cm³)

Dr: Densidad real (g/cm³)

2.4.1.4 Determinación de capacidad de campo.

El método utilizado fue el de la olla de presión, la cual se basa en aplicación de 0,33 atm a la muestra de suelo saturado durante 48 horas, el agua gravitacional es expulsada y el contenido de humedad en la muestra es la capacidad de campo (Richards y Weaver, 1944).

2.4.1.5 Determinación de punto de marchitez.

El método utilizado fue el de la olla de presión, la cual se basa en aplicación de 15 atm a la muestra de suelo saturado durante 48 horas, el agua gravitacional es expulsada y luego se determina su contenido de humedad (Richards, 1948).

2.4.1.6 Determinación de lámina de agua almacenable.

Después de obtener la capacidad de campo y el punto de marchitez se aplicó la fórmula propuesta por Amezcua (1995).

$$LAA = \frac{(CC - PMP)}{100} \times \frac{Da}{D_{H_2O}} \times \text{profundidad}$$

Dónde:

LAA= Lamina potencialmente almacenable (mm)

CC= Capacidad de campo (%)

PMP= Punto de marchitez permanente (%)

Da= Densidad aparente (g/cm³)

D_{H₂O}= Densidad del agua a 20 °C (g/cm³)

Profundidad= profundidad del horizonte evaluado

2.4.1.7 Determinación de textura.

Para conocer el contenido porcentual de arenas, limos y arcillas del suelo se utilizó el método del hidrómetro de Bouyucos, Las partículas suspendidas en el agua se asientan diferencialmente dependiendo de la cantidad de superficie por unidad de volumen. Las partículas de arcilla tienen una gran área superficial por unidad de volumen y se asientan lentamente. Mientras que las de arcilla se asientan rápidamente debido a su baja superficie específica (Forsythe, 1975).

2.4.1.8 Determinación de estabilidad de agregados.

Para medir el grado de estabilidad de los agregados a la acción de agua se utilizó el método Yoder (1936); consiste en colocar una serie de tamices en un aparato con agitación vertical. El movimiento continuo de los tamices dentro del agua ejerce su efecto sobre la degradación de los agregados estructurales, al final se cuantifica la cantidad de agregados retenidos en cada tamiz.

2.4.1.9 Determinación del índice de estabilidad.

Con los porcentajes de agregados podemos calcular el Índice de Estabilidad de la siguiente manera:

$$I.E = \frac{X2 + X3 + X4}{X1 + X5}$$

Índice de estabilidad = A/B

A= porcentaje de agregados en los tamices intermedios

B= porcentaje de agregados en los tamices extremos.

2.4.2 Métodos químicos de suelos

2.4.2.1 Determinación de pH

Se utilizó el método potenciométrico para medir el pH. Consistió en la medida del potencial con un electrodo sensitivo a iones H⁺ presentes en una solución de relación suelo-agua 1:1.

2.4.2.2 Determinación de conductividad eléctrica

El método de la conductividad eléctrica se realiza por medio de un conductímetro sobre el extracto de la muestra de suelo.

2.4.2.3 Determinación de materia orgánica

Para obtener el contenido de materia orgánica, se cuantificó el contenido de Carbono orgánico oxidable total de la muestra por el método de Walkley and Black (1934), metodología en la que se utiliza el dicromato de potasio en medio ácido para oxidar la muestra y provoca la formación de CO₂, posteriormente el dicromato que no sea transformado se valora con Sal de Mohr.

2.4.2.4 Determinación de nitrógeno disponible

A partir del contenido de materia orgánica obtenida se calculó la cantidad de nitrógeno disponible, debido a que el 5% de la materia orgánica es nitrógeno total, y que 1,5% de este nitrógeno se mineraliza, se realizaron los siguientes cálculos:

$$N_{(TOTAL)} = MO \times 0,05$$

$$N_{(DISPONIBLE)} = N_{(TOTAL)} \times 0,015$$

2.4.2.5 Determinación de la capacidad de intercambio catiónico (CIC) y bases intercambiables (Ca, Mg, Na y K)

Se empleó el método de acetato de amonio, la determinación consiste en la saturación de la superficie de cambio del catión índice de amonio, y el extracto obtenido es analizado por absorción atómica para determinar las bases intercambiables.

El extracto que quedo de cationes intercambiables se destila para determinar el contenido de amonio (CIC) (Rhoades, 1982).

2.4.2.6 Determinación de Fosforo

Para la medición de P soluble se utiliza el método Bray (desarrollado por Bray y Kurtz, 1945). La cuantificación se lleva a cabo por colorimetría. Este método se emplea como índice de P aprovechable en suelos con pH neutro y ácido.

2.4.2.7 Determinación de Azufre

Se utiliza el método turbidimetrico utilizando como extractante una mezcla acida (nitríco – perclórico 2:1). La cuantificación se lleva a cabo por colorimetría (McKean, 1993).

2.4.2.8 Determinación de aluminio intercambiable

La metodología para la determinación de acidez intercambiable es el método de Barnhisel y Bertsch (1982) que utiliza el cloruro de potasio.

2.4.2.9 Determinación de Boro

El método es propuesto por el laboratorio de campo del Ingenio Providencia; se utiliza el Monofosfato de Calcio $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 0.008M propuesto por Hunter (1974) para la extracción del elemento, el cual, aunque extrae aproximadamente la tercera parte del

obtenido por el agua caliente, tiene las siguientes ventajas según estudios realizados en el ICA:

- a) La extracción puede hacerse a temperaturas ambiente, utilizando material plástico.
- b) La cantidad extraída presenta buena correlación por la extraída por la planta.
- c) Los extractos son cristalinos.

Para la determinación del elemento, se utiliza el reactivo de color Azometina-H que es muy sensible al Boro y forma el complejo Boro-Azometina-H de color amarillo, el cual es estable por más de una hora.

2.4.2.10 Determinación de Micronutrientes Cu, Fe, Mn y Zn

Se empleó el método de ácido dietilentriaminopenta-acético DTPA – trietanolamina TEA, para la extracción de los micronutrientes. El método fue publicado por Lindsay y Norvell en 1978. El extracto obtenido es analizado por absorción atómica para determinar los nutrientes.

2.4.3 Métodos químicos en tejido foliar.

2.4.3.1 Determinación de clorofila

Se tomaron las medidas en horas de la mañana, utilizando un clorofilometro (Minolta Spad-502, Estados Unidos) tomando 3 medidas a lo largo de la hoja.

2.4.3.2 Determinación de nitrógeno

La determinación de nitrógeno total se realiza por el método Kjeldahl, el cual comprende tres fases: digestión, destilación y valoración. Este método fue por Bremmer y Tabatabai, 1972.

2.4.3.3 Determinación de Fosforo

Se determina el fósforo por el método de azul de molibdeno (Murphy y Riley, 1962). El método se basa en la producción de un complejo fosfomolibdico en una solución acida, realizando la cuantificación por espectrofotometría.

2.4.3.4 Determinación de azufre.

Se utiliza una mezcla ácida para la digestión del tejido vegetal, el sulfato SO_4^{2-} digerido es medido por el método turbidimétrico que es la medida de la pérdida de la luz transmitida debido a las partículas suspendidas en la solución (McKean, 1993).

2.4.3.5 Determinación de Ca, Mg, K y Na

El contenido total de Ca, Mg, K y Na se determina después de la destrucción de la materia orgánica en el tejido por medio de digestión nitroperclórica. Para medir los niveles de los elementos, se usa el procedimiento de espectrofotometría de absorción atómica para Ca y Mg y emisión para K y Na (Isaac y Kerber, 1971). (Isaac y Kerber, 1971).

2.4.3.6 Determinación de Boro

El contenido de boro total en tejido se determina después de la calcinación y extracción con ácido sulfúrico (Gaines y Mitchell, 1979). Se realiza la lectura en el extracto por colorimetría, usando el método de azometina-H.

2.4.3.7 Determinación de Micronutrientes Cu, Fe, Mn y Zn.

El contenido total de Cu, Fe, Mn y Zn se determina después de la destrucción de la materia orgánica en el tejido por medio de digestión nitroperclórica. Para medir los niveles de los elementos, se usa el procedimiento de espectrofotometría de absorción atómica (Isaac y Kerber, 1971).

2.4.4 Métodos de evaluación agronómica del cultivo

2.4.4.1 Determinación de altura de tallo

Se tomó la medida desde el suelo hasta la última lígula visible.

2.4.4.2 Determinación de población del tallo

Se contó los números de tallos en el surco 6 y 7 (centrales) en 10 metros.

2.4.4.3 Determinación de diámetro del tallo

En la mitad de tallo se observa la yema y se mide con un pie de rey el diámetro.

2.4.4.4 Determinación de Brix en jugo de caña de azúcar

Los Brix del jugo se refiere al contenido de sólidos solubles totales presentes, incluyendo azúcares y compuestos que no son azúcares. Esta medida se realiza con un refractómetro, el cual consiste en determinar la velocidad de propagación de la luz en el jugo y el cual se relaciona con la densidad del mismo.

2.4.4.5 Determinación de polarización en el jugo de caña de azúcar.

La determinación de azúcar en jugo se hace por polarimetría, es la medida de la rotación angular de las sustancias ópticamente activas en un plano de luz polarizada; el resultado que se obtiene de la polarización directa de una solución de sacarosa.

2.5 Montaje y conducción del experimento

Se utilizó una suerte de renovación, preparando el suelo con cincelado a una profundidad de 50 a 75 cm para romper capas compactadas, se realizó arado para incorporar restos orgánicos del cultivo anterior, posteriormente el discado para romper terrones, nivelación del terreno para darle el gradiente de pendiente adecuado para drenar los excesos de agua durante la estación lluviosa y finalmente la formación de surcos. La profundidad de los surcos debe ser 25 cm. El fondo del surco debe quedar suelto hasta unos 10 cm.

Se inició el experimento tomando las medidas del área total para distribuir las parcelas de forma organizada, dejando los espacios en los bordes para evitar efectos de los mismos. Se contaron 12 surcos a lo ancho y se midió 10 m a lo largo para delimitar la primera parcela utilizando estacas y se marcó para ubicarla y tomar las posteriores muestras antes de la aplicación de compost. Se dejaron 3 m de callejón para tomar la próxima medida de 10 m a lo largo para delimitar la segunda parcela y se continuó de igual manera hasta llegar a la parcela nueve, se volvió a ubicar en la parcela 1 y se contó los 12 surcos siguientes y se midió 10 m a lo largo para delimitar la parcela 10, se contó los 3 m de callejón y se midió los 10 m para ubicar la parcela 11 y así sucesivamente hasta llegar la parcela 60.

Se tomaron muestras de suelo a 20 cm de profundidad en cada parcela, de manera aleatorizada (zig-zag), conformando la muestra de 500 g de suelo para análisis químicos, para los análisis físicos se introdujeron anillos de acero de 5 cm de longitud por 5 cm de diámetro a una profundidad de 10 cm para tomar la muestra sin disturbar.

Se aplicó el compost en plantilla de forma manual de 10, 20, 30 y 40 ton en edades de 70, 95, y 120 días de acuerdo a la aleatorización realizada para cada parcela (Figura 5). Se procedió a la siembra, depositando las semillas en el suelo, las cuales son trozos de tallo de 60 cm, posteriormente se tapan con una delgada capa de suelo.

Se realizó el aporque, actividad que debe efectuarse antes de los tres meses de edad de la plantación y consiste en remover tierra de los entresurcos para levantar el surco con el propósito de defender la caña de azúcar de la humedad del invierno, encauzar el agua de riego en el verano y evitar que la maquinaria pise la plantación.

Para evaluar el cultivo se midió la altura y población en tallos a los tres meses y altura, población y diámetro a los seis meses; antes de cosecha se tomó muestra de 15 a 20 tallos aleatorios en la parcela para análisis de °Brix y polarización lo cual permitió conocer el rendimiento TSH (tonelada de sacarosa por hectárea), a los trece meses se cortó y se pesó la caña de azúcar por cada parcela, y se determinó el TCH.

Además, se midió clorofila a las hojas en la misma época de muestreo de los tallos y para análisis de tejido foliar se tomaron 25 hojas en la última lígula visible en forma de zig-zag, posteriormente se procedió a quitar la vena de las hojas recolectadas para su posterior análisis.

Se muestreo el suelo después de la cosecha para análisis químicos y físicos de igual manera que antes de aplicación de compost como se mencionó anteriormente.

3. Resultados y discusión

3.1 Calidad del compost generado de residuos de caña de azúcar

Es importante iniciar precisando que la calidad de los abonos orgánicos es relativa. El abono orgánico tiene un perfil nutricional que puede o no resultar idóneo para el escenario de clima, suelo y cultivo en el cual va a actuar (Gómez, 2000). Sin embargo, se consideran tres aspectos para definir la calidad de un abono. El primero es proporcionar el NPK al suelo y las plantas, el segundo es el porcentaje mínimo de materia orgánica, y el tercero es el aporte de todos los elementos esenciales, en los niveles apropiados o no, y también elementos no esenciales.

En la tabla 2 se observa la calidad de los tres compost utilizados en este ensayo, y los límites exigidos por la norma (NTC 5167, 2011) que rige actualmente en Colombia para abonos orgánicos.

En las variables evaluadas se observó en las tres edades del compost tendencia general hacia el cumplimiento de los parámetros de la norma. Hay un descenso de humedad al transcurrir el tiempo de descomposición, debido a la actividad metabólica de los microorganismos que se traduce en incremento de temperatura, y disminución de esta variable, además del ascenso del pH a este comportamiento en la fase final de maduración que debe estar entre 7 y 8, siendo esto consecuencia de las propiedades naturales de amortiguador de las sustancias húmicas que se producen en el proceso (Labrador, 2002).

La CE no es un parámetro que presenta un límite establecido en la norma, sin embargo, se consideran los valores altos de acuerdo a Suzuki *et al.*, (2004) quienes reportan valores que están entre un rango de 0.2 a 6.8 dSm⁻¹. Por su parte, Campitelli y Ceppi (2008) aseguran que el valor máximo de CE para un compost debe ser de 4 dSm⁻¹. Mientras que Christian, Evanylo and Pease (2009) afirman que, si el compost se va utilizar como un mejorador de suelos y no como un sustrato único para plantas de vivero, puede tener un valor máximo de 20 dSm⁻¹.

La relación C/N muestra un indicativo del avance del compostaje, la relación óptima inicial está comprendida entre 25-30, a medida que transcurre el proceso la relación se hace cada vez menor debido a la transformación de la materia orgánica en humus y el desprendimiento de carbono en CO₂ (Labrador, 2002). Por lo tanto, se puede pensar que los valores son aceptables en esta variable.

Tabla 2. Caracterización fisicoquímica de los compost, comparado frente a la NTC 5167 (2011).

Parámetro	Límites permisibles	Edad		
		70 días	95 días	120 días
Humedad (%)	Máximo 30%	24	21	10
Cenizas	Máximo 60%	50	49	62
C.O	Mínimo 15%	12,3	12,6	11,2
M.O		21	22	19
pH	Mayor de 4 y menor de 9	7,7	7,5	7,4
Densidad Real (g cm ⁻³)	Máximo 0.6 g/ cm ³	0,63	0,59	0,66
CE (dS m ⁻¹)		17,20	22,60	24,80
CRA (%)	Mínimo su propio peso	96	111	85
CIC (cmol kg ⁻¹)	Mínimo 30 cmol/kg	30	33	34
C/N		19,00	17,00	15,00
N - Total (%)	Declarar si es mayor a 1%	0,90	0,97	1,01
P ₂ O ₅	Declarar si es mayor a 1%	1,31	1,25	1,38
K ₂ O	Declarar si es mayor a 1%	1,51	2,02	1,92
CaO	Reportar	3,07	3,57	3,46
MgO		0,96	1,10	1,22
S		0,18	0,66	0,52
Na ₂ O		0,3	0,3	0,3
Al		2,0	2,0	1,9
Mo		ND	ND	ND
Si		30,4	31,2	36,5
Fe (mg l ⁻¹)	Reportar	5733	5369	8646
Mn		396	412	498
Cu		54	48	57
Zn		104	99	118
B		17	19	25

Fuente: Laboratorio Agrilab S.A., 2013.

El no cumplimiento del 15% de carbono en las tres edades es consecuencia de una alta actividad microbiana y un buen proceso de compostaje o de mineralización, ya que disminuye con el aumento de la edad. Lo cual se puede correlacionar con el aumento de la concentración de sales evidenciado con la CE, con las cenizas que presentaron valores por encima de 60% en el compost con mayor madurez y con el aumento en la densidad en el compost de 120 días.

Para el caso del contenido de nutrientes mayores, el N total presentó valores aceptables cercanos a la unidad en edad de 70 y 95 días y por encima a los 120 días, este nutriente se puede perder por volatilización al transformarse en gas amónico, siendo influenciado por la relación C/N inicial, temperatura de las pilas, el sistema de volteo, el pH e incluso la aireación excesiva, ocasionado que no esté presente en cantidades optimas en el abono.

Lo deseable para una buena calidad de un abono es que el contenido de N sea del 2 al 3% (Gómez, 2000) y se encuentre estabilizado. Se espera con valores por debajo del 1% una pobre gestión en el suelo.

Por el contrario el P y K siempre están por encima del 1%, resultados relacionados con el proceso de mineralización dado entre el inicio y el final de la fermentación no hay una pérdida de los mismos, produciendo aumento en la concentración debido a la transformación de materia orgánica (Díaz, *et al.* 2004).

Se conoce que la liberación del P se encuentra vinculada a la descomposición del abono orgánico en el suelo, tal como ocurre con el nitrógeno y el azufre (Gómez, 2000). Además, el aporte de este elemento se puede generar por el contenido del mismo en la cachaza, residuo que recibe P en el proceso de fabricación de azúcar.

En cuanto al K es un elemento de mayor disponibilidad por cuanto es de carácter funcional, no constitutivo de la arquitectura vegetal. La disponibilidad inmediata esta entre valores del 70 a 90%, que si bien es una ventaja también representa un riesgo de pérdida por lixiviación (Gómez, 2000).

Otros elementos mayores que se destacan por su contenido significativo en las tres edades fueron Ca y Mg, de acuerdo a lo reportado por Bohórquez (2014) una mayor utilización de cachaza aumenta el contenido de nutrientes debido a la composición química de este subproducto el cual presenta un mayor contenido de cationes como Ca, Mg, Na y K.

El Ca, además de elemento esencial para las plantas vasculares, juega un papel importante en la estructura del suelo. Está muy vinculado a las partes estructurales de los tejidos vegetales, por lo que es de mediana disponibilidad. La cachaza es un aporte de este elemento por la adición de cal apagada (CaOH) en este proceso de clarificación del jugo de caña de azúcar.

El Mg tiene una dinámica química muy compleja en el suelo y de modo general se puede lixiviar más fácilmente en el suelo que el Ca, por lo que si proviene de abonos orgánicos tiene menos pérdida de lixiviación, en tejidos vegetales su contenido es menor que el Ca (Gómez, 2000)

El Si también presentó concentraciones representativas, valores por encima del 30%, estos contenidos benefician al suelo, formando estructuras a través de la creación de puentes de Si entre partículas (Matichenkov, *et al.* 2001). Con el incremento de ácidos polisilícicos, el grado de agregación, la capacidad de retención hídrica, la capacidad de intercambio catiónico y la capacidad tampón de suelos ligeros se incrementa. Además, la adición de Si puede incluirse como una alternativa para el manejo integrado de enfermedades, disminuye el efecto negativo del Al, Fe y Mn (Osorno, 2012). Este aporte se da por la utilización de ceniza de origen mineral, como materia prima en la formulación inicial de la pila de compost.

Aunque los elementos menores no presentan límites establecidos en la NTC 5167 para abonos orgánicos, son elementos esenciales para los cultivos, la cantidad de micronutrientes en los distintos compost y países es muy variada (He *et al.*, 2004). Para el caso específico del cultivo de caña de azúcar, la guía de recomendación de nutrientes de acuerdo con los antecedentes de respuesta agronómica (Gómez y Castro, 2009) son en Kg/ha de 1 – 3 en B, 2 -8 Zn, 1 - 2 Cu, 1 -6 Fe y 1 – 6 en Mn. Valores muy bajos con respecto a los mayores contenidos presentes en este compost.

La escala de elementos menores en el suelo y en vegetales es similar: Fe>Mn>Zn>Cu>B. El Fe, aun cuando mayoritario en este grupo, en los recursos orgánicos muestra disponibilidad por debajo del 1% (Gómez, 2000). El Mn, también vinculado en su disponibilidad, como el Fe al estado de reducción del suelo, muestra disponibilidades menores que el Fe en los recursos orgánicos.

El Cu es un elemento que tiene dificultades con la materia orgánica. El hecho de su indisponibilidad en suelos orgánicos y aunque requerido por las plantas en bajas cantidades presenta deficiencias a veces al aplicar abonos orgánicos. El B es referido a menudo como

posible de abastecer desde las materias orgánicas. El contenido de B en los abonos orgánicos corrientes no pasa de 60 ppm (Gómez, 1996) pero tiene la particularidad que la mayoría de ese contenido total es disponible, lo cual es ventaja, pero también es un riesgo para su pérdida a través del proceso de lavado.

3.2 Efecto del compost en las propiedades físicas del suelo

3.2.1 Caracterización física de la suerte 19Z

La caracterización física del suelo utilizado en el ensayo es lograda con los valores promedio de 60 muestras, obtenidas antes de aplicar los tratamientos de compost (Tabla 3).

**Tabla 3. Caracterización física del suelo
Chromic Endoaquerts Horizonte Ap
de la suerte 19Z**

Parámetro	Resultado
Textura (%)	
Arena	17,96 ± 1,9
Limo	17,50 ± 1,8
Arcilla	64,53 ± 1,0
Densidad (g cm ⁻³)	
Aparente	1,16 ± 0,03
Real	2,33 ± 0,01
Porosidad (%)	50,45 ± 1,4
Capacidad de campo (%)	30,71 ± 0,8
Punto marchitez (%)	16,87 ± 0,4
Lámina de agua (mm)	15,99 ± 0,7
Estabilidad de agregados (%)	
2 mm (# 10)	44,53 ± 4,2
0,84 mm (# 20)	21,20 ± 3,0
0,5 mm (# 35)	15,76 ± 1,5
0,25 mm (# 60)	5,12 ± 1,3
< 0,25 mm (# < 60)	13,39 ± 1,9
Índice de estabilidad	0,74 ± 0,14

Nivel de confianza P < 0,05

Promedio para 60 muestras

Los resultados muestran datos similares al estudio detallado de suelos que se llevó a cabo entre el IGAC y Cenicaña (2003).

La consociación Rio de Janeiro presenta texturas muy finas originando suelos superficiales, pobremente drenados y características vérticas, posee valores de densidad aparente entre 1,18 y 1,45 Mg m⁻³, densidad real entre 2,45 y 2,65 Mg m⁻³, la porosidad total fluctúa entre 44 y 53%, sin embargo, el contenido de agua aprovechable está por debajo de lo esperado para este tipo de suelo. Valenzuela, Torrente (2010) exponen que suelos arcillosos retienen mayor cantidad de agua, se ha encontrado que, a una profundidad, de 0 a 31 cm es igual a 51,9 mm, esta diferencia se atribuye al déficit de agua presentado en esta época donde la evaporación (122,7 mm) superó la precipitación (9,9 mm). Además de encontrar mayor resistencia de los agregados a la acción del agua en niveles ligeramente a moderadamente estables, de acuerdo a lo establecido por el IGAC (1990), este comportamiento es consecuencia del dominio de los microporos, que son influenciados por las fuerzas con que las arcillas y otros componentes inorgánicos del suelo son absorbidos por la materia orgánica particulada, residuos microbianos y otros coloides orgánicos y compuestos de origen microbiano (Jastrow, *et al.* 1998)

El análisis de varianza mostro diferencias significativas ($p > 0,05$) en las propiedades físicas después de la aplicación de compost por efecto de la interacción dosis*edad en la estabilidad de agregados (0,5 mm), y no presenta diferencias en densidad aparente y real, porosidad, estabilidad de agregados (2.0, 0.84, 0.25 y <0.25 mm), índice de estabilidad, capacidad de campo, punto de marchitez y lámina de agua (Tabla 4).

Tabla 4. Resumen del análisis de varianza para las propiedades físicas del suelo *Chromic Endoaquerts* Horizonte Ap de la suerte 19Z

Variable de respuesta	Efecto		
	Edad	Dosis	Edad*Dosis
Densidad (g cm ⁻³)			
Aparente	0,33	0,63	0,58
Real	0,38	0,42	0,46
Porosidad (%)	0,15	0,84	0,76
Capacidad de campo (%)	0,97	0,56	0,91
Punto marchitez (%)	0,68	0,61	0,69
Lámina de agua (mm)	0,26	0,71	0,16
Estabilidad de agregados			
2 mm (# 10)	0,37	0,53	0,27
0,84 mm (# 20)	0,12	0,44	0,78
0,5 mm (# 35)	0,99	0,33	0,01 *
0,25 mm (# 60)	0,89	0,25	0,91
< 0,25 mm (# < 60)	1,00	0,97	0,52
Índice de estabilidad	0,56	0,53	0,19

* p - valor <0,05 se concluye diferencia entre al menos dos niveles

3.2.2 Cambios en las variables físicas por efecto de la interacción edad*dosis del compost

La estabilidad de agregados (0,5 mm) presentó cambios significativos en la interacción edad*dosis, sin embargo, en las diferentes edades no se presentaron cambios significativos, en las diferentes dosis los mayores valores estuvieron en 40 t ha⁻¹, y el menor en 20 t ha⁻¹, son congruente estos resultados con el aporte de Ca realizado con la aplicación de compost, la formación de agregados está ligado a fenómenos de floculación de coloides, este fenómeno tiene lugar cuando los coloides están saturados por iones de Ca, su mayor saturación en el complejo coloidal con 40 t ha⁻¹, es ocasionado por el predominio de las arcillas tipo 2:1, su alta capacidad de intercambiar cationes permite la adición de nuevos iones o cambios en la concentración de la solución, siendo el Ca retenido con más fuerza por su carácter bivalente y menor radio iónico hidratado (Navarro, *et al.* 2013).

Además del proceso de floculación expuesto anteriormente, otro mecanismo de agregación del suelo es la incorporación de MO, es conocido que tiene un efecto agregante en el suelo y se hace mayor a medida que decrece el contenido de arcilla, y además ayuda a estabilizar la estructura del suelo.

Al adicionar compost, se están llevando poblaciones de microorganismos, que durante su actividad, las células y microorganismos por si mismos pueden mantener unidas partículas de suelo de manera mecánica. La actividad microbiana también ayuda a la formación de agregados con la producción de ciertos compuestos durante la descomposición de la MO denominado humus. En los Vertisoles, donde la MO ha evolucionado a un humus muy estable y polimerizado, denominado mull, se establece una relación estrecha del Ca con los ácidos húmicos grises a través de la arcilla 2:1 formando un complejo arcillo-húmico muy estable (Bohn, et al. 1993).

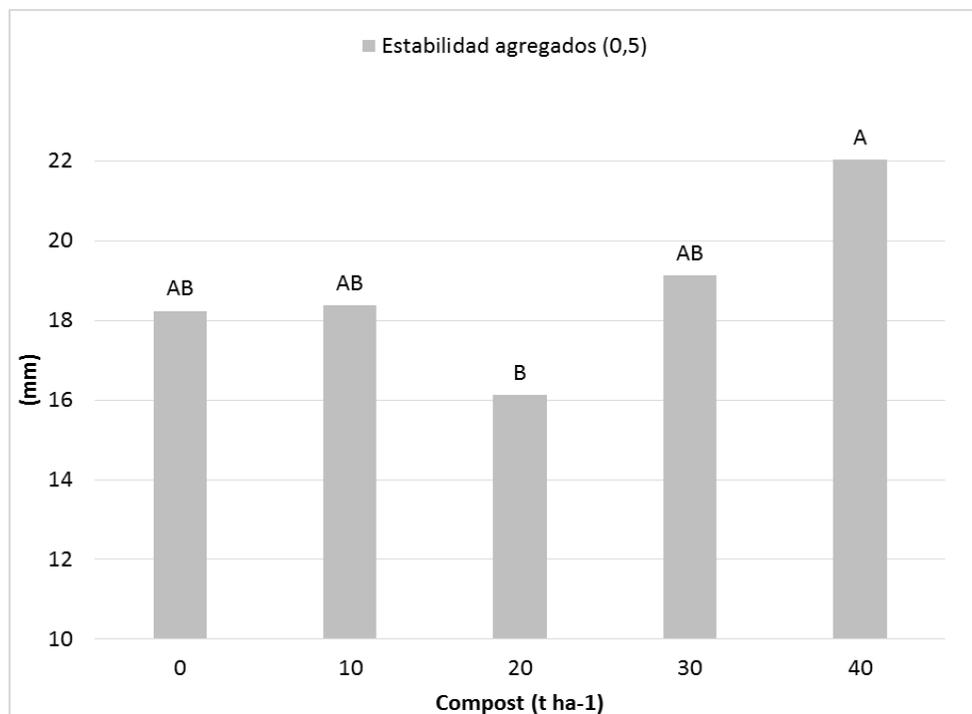


Figura 7. Variación de la estabilidad de agregados (0,5 mm) después de la aplicación de compost del suelo Chromic Endoaquerts Horizonte Ap de la suerte 19Z

Tabla 5. Resumen de las diferencias estadísticas en las variables de respuesta físicas del suelo *Chromic Endoaquerts* Horizonte Ap de la suerte 19Z

Fuente de Variación		Densidad		Porosidad total	Estabilidad de agregados					IE	Capacidad de campo	Punto de Marchitez	Lámina de agua
		Aparente	Real		Tamiz # 10	Tamiz # 20	Tamiz # 35	Tamiz # 60	Tamiz # <60				
Edad	Dosis	g cm ⁻³		%	2 mm	0,84 mm	0,5 mm	0,25 mm	<0,25 mm	%	%	mm	
70	0	1,19 aα	2,41 aα	50,37 aα	26,27 aα	30,00 aα	15,52 aαβ	6,69 aα	21,52 aα	1,24 aα	29,75 aα	17,88 aα	14,33 aα
	10	1,21 aα	2,37 aα	49,15 aα	17,67 aα	19,23 aα	24,07 aαβ	9,29 aα	29,75 aα	1,13 aα	30,95 aα	17,99 aα	15,64 aα
	20	1,23 aα	2,36 aα	47,65 aα	30,01 aα	16,27 aα	19,09 aβ	15,45 aα	19,17 aα	1,11 aα	29,94 aα	17,20 aα	15,71 aα
	30	1,22 aα	2,36 aα	48,29 aα	20,16 aα	23,93 aα	21,03 aαβ	8,81 aα	26,07 aα	1,17 aα	30,07 aα	17,48 aα	15,39 aα
	40	1,58 aα	2,40 aα	50,51 aα	23,81 aα	22,56 aα	14,76 aα	14,65 aα	17,06 aα	0,94 aα	27,96 aα	17,17 aα	21,73 aα
95	0	1,22 aα	2,38 aα	48,74 aα	37,52 aα	17,64 aα	16,12 aαβ	7,37 aα	21,35 aα	0,73 aα	29,31 aα	17,04 aα	14,96 aα
	10	1,24 aα	2,37 aα	47,43 aα	54,41 aα	12,93 aα	10,36 aαβ	5,75 aα	16,55 aα	0,57 aα	30,39 aα	17,46 aα	16,06 aα
	20	1,19 aα	2,37 aα	49,60 aα	27,01 aα	20,49 aα	17,11 aβ	14,12 aα	21,27 aα	1,07 aα	29,11 aα	16,92 aα	14,55 aα
	30	1,28 aα	2,38 aα	46,17 aα	23,37 aα	19,13 aα	19,87 aαβ	75,87 aα	30,04 aα	0,90 aα	29,09 aα	16,91 aα	15,62 aα
	40	1,25 aα	2,38 aα	47,69 aα	15,35 aα	15,85 aα	29,73 aα	14,35 aα	24,72 aα	1,58 aα	29,80 aα	17,33 aα	15,58 aα
120	0	1,20 aα	2,37 aα	49,17 aα	18,75 aα	23,40 aα	23,08 aαβ	9,41 aα	25,36 aα	1,32 aα	30,40 aα	17,46 aα	15,60 aα
	10	1,17 aα	2,34 aα	50,12 aα	27,28 aα	20,29 aα	20,71 aαβ	9,05 aα	22,67 aα	1,04 aα	29,78 aα	17,31 aα	14,54 aα
	20	1,21 aα	2,35 aα	48,62 aα	30,89 aα	20,36 aα	12,17 aβ	11,88 aα	24,69 aα	0,82 aα	31,65 aα	18,19 aα	16,25 aα
	30	1,16 aα	2,39 aα	51,35 aα	30,80 aα	21,80 aα	16,45 aαβ	13,57 aα	17,37 aα	1,10 aα	30,30 aα	17,62 aα	14,73 aα
	40	1,15 aα	2,40 aα	52,02 aα	23,49 aα	22,48 aα	21,59 aα	9,52 aα	22,92 aα	1,16 aα	26,75 aα	15,41 aα	13,05 aα

Letras a, b corresponden a cambios en edad y α, β corresponden a cambios en dosis.

3.3 Efecto del compost en las propiedades químicas del suelo

3.3.1 Caracterización química de la suerte 19Z

La caracterización química del suelo utilizado en el ensayo (tabla 6) es lograda con los valores promedio de 60 muestras, obtenidas antes aplicar los tratamientos de compost.

Tabla 6. Caracterización química del suelo *Chromic Endoaquerts* Horizonte Ap de la suerte 19Z

Parámetro	Resultado
pH	4,87 ± 0,08
CE (dS m ⁻¹)	0,07 ± 0,02
Materia orgánica (%)	3,30 ± 0,1
Nitrógeno disponible (%)	0,0022 ± 0,0003
Elementos Mayores (cmol kg ⁻¹)	
Ca	10,45 ± 1,0
Mg	10,97 ± 0,6
K	0,24 ± 0,03
Na	0,23 ± 0,02
Al	0,46 ± 0,1
CIC	30,79 ± 2,0
Elementos Mayores (mg l ⁻¹)	
P	10,98 ± 1,8
S	8,50 ± 2,0
Elementos menores (mg l ⁻¹)	
B	0,29 ± 0,02
Cu	10,18 ± 0,7
Fe	139,74 ± 21,9
Mn	25,05 ± 2,2
Zn	2,79 ± 0,3

Nivel de confianza P < 0,05
Promedio para 60 muestras

Los resultados químicos están acordes con el estudio de suelos mencionado anteriormente (IGAC, Cenicaña, 2003) para esta zona del Valle del Cauca, la capacidad de intercambio catiónico está dominada por Ca y Mg, y en menor cantidad por K y Na, el

contenido de materia orgánica se clasificó como medio para el horizonte analizado, el P es bajo y el pH fuertemente ácido. Por otra parte, los elementos menores Fe, Mg, Cu y Zn presentaron valores mayores a los reportados por Castro (2004) en suelos con pH <5,5, sin embargo, se debe tener en cuenta que al aumentar la acidez del suelo se presenta mayor disponibilidad de estos micronutrientes (Bohn, et al. 1993).

El análisis de varianza muestra diferencias significativas ($p > 0,05$) en las propiedades químicas después de la aplicación de compost. El pH, la materia orgánica y el Fe presentaron diferencias entre al menos dos niveles de edad; Los elementos mayores Mg, K, Na, P y S en al menos dos niveles de dosis; Mn para la interacción edad*dosis, y no presenta diferencias en conductividad, N, CIC, Ca, B, Cu, y Zn, (Tabla 7).

Tabla 7. Resumen del análisis de varianza para las propiedades químicas del suelo *Chromic Endoaquerts* Horizonte Ap de la suerte 19Z

Variable de respuesta	Efecto		
	Edad	Dosis	Edad*Dosis
pH	0,05 *	0,88	0,49
CE (dS m ⁻¹)	0,31	0,55	0,61
Materia orgánica (%)	0,11 *	0,73	0,70
N disponible (%)	0,15	0,66	0,89
CIC (cmol kg ⁻¹)	0,99	0,52	0,55
Elementos Mayores (cmol kg ⁻¹)			
Ca	0,73	0,57	0,17
Mg	0,39	0,14 *	0,25
K	0,86	0,11 *	0,31
Na	0,73	0,19 *	0,66
Al	-	-	-
Elementos Mayores (cmol kg ⁻¹)			
P	0,67	0,02 *	0,48
S	0,33	0,07 *	0,12 *
Elementos menores (mg l ⁻¹)			
B	0,12	0,10	0,11
Cu	0,58	0,36	0,40
Fe	0,09 *	0,55	0,95
Mn	0,04 *	0,04 *	0,74
Zn	0,28	0,17	0,89

* p - valor <0,05 se concluye diferencia entre al menos dos niveles

3.3.2 Cambios en las variables químicas por efecto de la edad del compost

La MO presentó cambios significativos en el tratamiento donde se aplicó compost con estado de madurez de 95 días frente al compost de 70 (Ver tabla 8), estos valores están en un rango medio (Entre 2 y 4%) según las categorías establecidas por Cenicaña (Castro, 2010) para las condiciones climáticas predominantes en la zona de estudio. Estos resultados son congruentes con lo afirmado por Robertson y Morgan (1995) que determinaron que a mayor edad del compost menor tasa de mineralización. Por lo tanto, se considera que, en el compost de 70 días, presenta un mayor contenido de MO fresca, que continua su proceso de descomposición en el campo, liberando nutrientes por lixiviación o volatilización, y disminuyendo la concentración de MO (Balkcom et al., 2001). Por otra parte, la aplicación de las diferentes dosis de compost no presento cambios significativos en la MO, sin embargo, se presentó un aumento progresivo entre 0 - 30 t ha⁻¹ (2.91, 3.08 y 3.10 % respectivamente).

El aporte de MO influyó en la determinación del pH como lo reportó Daza (2014) para suelos ácidos. El valor promedio inicial de pH fue de 4,87, considerado fuertemente ácido; después de la aplicación de compost se obtuvo valores entre 5,67 y 6,03 (Ver tabla 8), clasificado como moderadamente ácido, favoreciendo este comportamiento a la mayor disponibilidad de algunos nutrientes, asimilación de Ca y Mg, y mejor actividad microbiana (Navarro, *et al.* 2013). Estos resultados también están asociados al aporte significativo de Ca en el compost incorporado, el cual está presente en forma de CaOH, proveniente del proceso de clarificación de la cachaza o como CaCO₃, producido en el proceso de compostaje, permitiendo en ambos casos una neutralización de H⁺ en el complejo coloidal, y un aumento del Ca intercambiable.

Sin embargo, los mayores valores para pH se presentaron con la aplicación de compost con 70 días de madurez (5.90), y los menores a los 120 días (5.73), los resultados muestran que compost más frescos tienden aumentar más el pH que los maduros o estabilizados. Este comportamiento puede estar asociado con la mayor presencia de ácidos húmicos en los compost maduros, los cuales no permiten que el pH se eleve, pero también actúan como amortiguadores naturales debido a su gran capacidad de intercambio catiónico (Labrador, 2002).

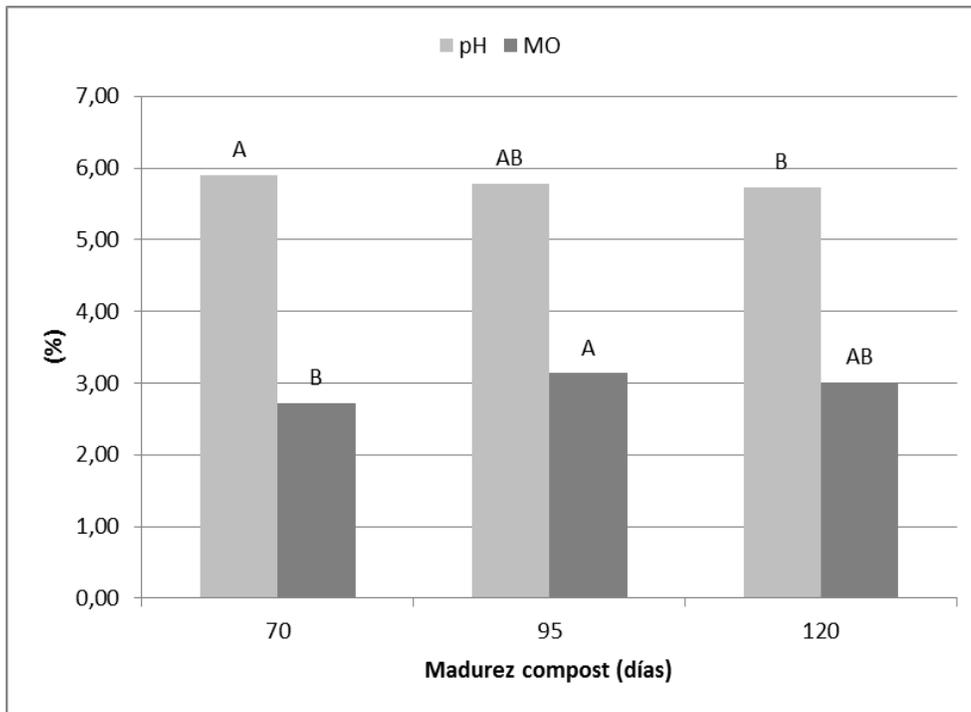


Figura 8. Variación de los contenidos de pH y MO después de la aplicación de compost del suelo Chromic *Endoaquerts* Horizonte Ap de la suerte 19Z

3.3.3 Cambios en las variables químicas por efecto de la dosis del compost

El K se incrementó significativamente con la mayor dosis aplicada, 40 t ha⁻¹, y fue menor con 10 t ha⁻¹, estos valores se consideran adecuados (0,15 – 0,3 cmol/kg), según las categorías establecidas por Cenicaña (Castro, 2010); de acuerdo a la caracterización química inicial del suelo en experimentación (Ver tabla 6), la mayor absorción en el complejo coloidal corresponden a Ca y Mg, presentando incluso una relación invertida, este desbalance genera una deficiencia de K, sin embargo su progresivo aumento al incrementar la dosis abono orgánico, está relacionada con el mayor Ca absorbido en el complejo coloidal, pues este elemento es reemplazado con mayor facilidad que el H⁺, al añadir un fertilizante potásico soluble, el K⁺ sustituirá parte de los Ca⁺² en el coloide. Por lo tanto, cuanto mayor sea la saturación de Ca, mayor será la absorción al coloide de K de la disolución del suelo (Navarro, *et al.* 2013).

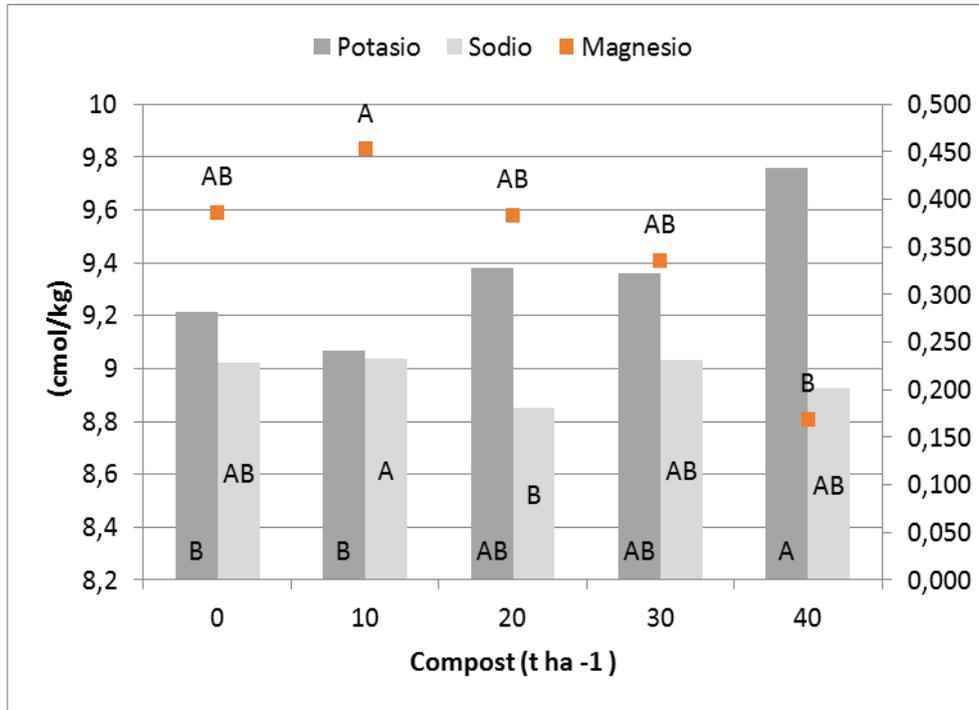


Figura 9. Variación de los contenidos de K, Na y Mg después de la aplicación de compost del suelo *Chromic Endoaquerts* Horizonte Ap de la suerte 19Z

En la figura 9, se observa el efecto opuesto del Mg al aplicar compost, los mayores valores para Mg se presentaron con aplicación de 10 t ha⁻¹ y los menores con 40 t ha⁻¹, estos resultados se consideran altos (1,5 – 2,5 cmol/kg), según las categorías establecidas por Cenicaña (Castro, 2010), correspondiendo estos valores a las características de este suelo. La absorción de este catión al coloide está determinada por su valencia y estado de hidratación (Navarro, *et al.* 2013), sin embargo, aunque junto con el Ca presentan igual valencia, el Ca, menos hidratado que el Mg está más fuertemente absorbido, por lo tanto, el Mg será más fácilmente intercambiable, y de acuerdo lo expuesto por Gómez, 2000, este elemento tiene una dinámica química muy compleja en el suelo y de modo general se puede lixiviar más fácilmente que el Ca.

Por otra el Na no presenta una correlación entre los contenidos de este elemento y las dosis; la mayor concentración de Na se encontró con la adición de 10 t ha⁻¹ y la menor con 20 t ha⁻¹, sin embargo, como se observa en la figura 9, sus diferencias son menos significativas, este comportamiento es asociado a la menor absorción por su valencia y mayor radio hidratado, por lo tanto, su menor presencia en el complejo de cambio permite ser lixiviado por agua de riego o lluvias en forma de Na₂SO₄.

56 Influencia de la aplicación de compost producido a partir de residuos de la caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L) en un Vertisol de Valle del Cauca

Tabla 8. Resumen de las diferencias estadísticas de las variables de respuesta químicas del suelo *Chromic Endoaquerts* Horizonte Ap de la suerte 19Z

Fuente de Variación		Elementos mayores (cmol kg ⁻¹)											Elementos menores (mg l ⁻¹)				
Edad	Dosis	pH	CE (dS m ⁻¹)	Materia orgánica (%)	Nitrógeno Disponible (%)	CIC (cmol kg ⁻¹)	Ca	Mg	K	Na	P (mg l ⁻¹)	S (mg l ⁻¹)	B	Cu	Fe	Mn	Zn
70	0	5,87 a	0,10 αα	2,75 b	0,0021 αα	27,68 αα	11,18 αα	9,29 αβ	0,25 β	0,25 αβ	6,90 γ	7,59 β	0,09 αα	11,56 αα	97,23 b	27,95 βα	1,50 αα
	10	5,87 a	0,09 αα	2,71 b	0,0020 αα	40,40 αα	11,05 αα	10,00 α	0,15 β	0,25 α	12,32 βγ	9,00 β	0,07 αα	11,91 αα	94,66 b	27,84 βα	1,69 αα
	20	6,03 a	0,12 αα	2,89 b	0,0022 αα	38,09 αα	12,29 αα	9,74 αβ	0,27 αβ	0,20 β	12,05 αβγ	11,92 α	0,07 αα	12,59 αα	110,75 b	29,02 βα	1,93 αα
	30	5,80 a	0,13 αα	3,14 b	0,0024 αα	27,91 αα	11,62 αα	8,93 αβ	0,35 αβ	0,22 αβ	9,30 αβ	13,60 β	0,15 αα	12,49 αα	99,60 b	27,54 βα	1,90 αα
	40	5,97 a	0,17 αα	2,11 b	0,0021 αα	41,08 αα	13,33 αα	8,06 β	0,54 α	0,18 αβ	23,05 α	2,17 β	0,06 αα	14,74 αα	92,18 b	19,01 bβ	2,36 αα
95	0	5,8 ab	0,11 αα	3,11 a	0,0023 αα	32,04 αα	11,57 αα	9,22 αβ	0,34 β	0,20 αβ	8,75 γ	6,63 β	0,08 αα	13,77 αα	116,44 a	26,45 aba	2,08 αα
	10	5,83 ab	0,16 αα	3,02 a	0,0023 αα	25,61 αα	13,34 αα	10,02 α	0,39 β	0,19 α	15,29 βγ	9,12 β	0,09 αα	13,11 αα	106,17 a	32,69 aba	1,97αα
	20	5,67 ab	0,17 αα	3,40 a	0,0026 αα	41,42 αα	11,31 αα	9,16 αβ	0,39 αβ	0,18 β	13,10 αβγ	21,45 α	0,07 αα	14,64 αα	128,87 a	31,95 aba	2,18 αα
	30	5,90 ab	0,16 αα	3,03 a	0,0023 αα	38,54 αα	13,60 αα	10,07 αβ	0,26 αβ	0,24 αβ	21,09 αβ	9,12 β	0,08 αα	14,55 αα	120,88 a	29,18 aba	2,37 αα
120	0	5,70 ab	0,11 αα	3,12 a	0,0023 αα	37,23 αα	10,30 αα	9,59 β	0,32 α	0,22 αβ	16,12 α	13,13 β	0,06 αα	13,14 αα	111,08 a	25,22 abβ	2,06 αα
	0	5,67 b	0,17 αα	2,88 ab	0,0022 αα	43,24 αα	10,56 αα	10,26 αβ	0,26 β	0,23 αβ	7,61 γ	13,79 β	0,05 αα	12,71 αα	101,15 ab	35,92 αα	1,83 αα
	10	5,70 b	0,12 αα	2,90 ab	0,0022 αα	33,44 αα	10,96 αα	9,45 α	0,18 β	0,26 α	8,80 βγ	6,37 β	0,06 αα	13,62 αα	99,99 ab	28,39 αα	1,81 αα
	20	5,90 b	0,13 αα	2,96 ab	0,0022 αα	43,36 αα	11,96 αα	9,85 αβ	0,33 αβ	0,16 β	16,35 αβγ	15,10 α	0,07 αα	13,11 αα	105,77 ab	35,36 αα	1,99 αα
	30	5,67 b	0,16 αα	3,13 ab	0,0023 αα	25,15 αα	11,93 αα	9,24 αβ	0,35 αβ	0,24 αβ	15,45 αβ	5,87 β	0,07 αα	15,16 αα	121,30 ab	33,06 αα	2,23 αα
40	5,73 b	0,30 αα	3,18 ab	0,0024 αα	31,54 αα	12,39 αα	8,78 β	0,44 α	0,21 αβ	18,41 α	4,74 β	0,08 αα	14,77 αα	115,47 ab	26,50 aβ	2,20 αα	

Letras a, b corresponden a cambios en edad y α, β corresponden a cambios en dosis.

Sin duda el aporte de Ca presente en el compost, mostro resultados y comportamientos interesantes en la concentración de cationes en el complejo coloidal, pues toda modificación de la concentración relativa de un catión, sea interno o externo, lleva consigo una reacción de cambio, debido a la modificación del equilibrio (Navarro, *et al.* 2013). Sin embargo, estos cambios no dependen solo de las propiedades del catión, sino de las partículas que los retienen, siendo las arcillas y el humus presente en este Vertisol, la que permitieron una alta CIC.

Esta propiedad fue caracterizada en los tres compost utilizados en el ensayo (Ver tabla 2), siendo valores adecuados con respecto a la NTC 5167, su aporte no fue significativo entre tratamientos, pero si se observa en la tabla 8, valores altos (>20 cmol/kg), para todas las dosis evaluadas, de acuerdo a lo reportado por Castro (2010), este comportamiento es atribuido al tipo de arcilla que predomina en esta región.

Además, el incremento de pH en el proceso de neutralización con CaOH y CaCO₃, favoreció en las arcillas y el humus la ionización de los grupos OH, que se condicionan por pH del medio donde se encuentren, ya que al aumentar el pH se incrementa el número de cargas.

Estos cambios beneficiaron la relación invertida entre Ca y Mg observada antes de aplicar el abono, contribuyendo a la mayor saturación de Ca por el aporte de compost (Ver figura 10), y en consecuencia, tendencia a la relación ideal que debe existir entre estos cationes una mejor absorción de estos nutrientes (ver tabla 9).

**Tabla 9. Balance de bases del suelo *Chromic Endoaquerts*
Horizonte Ap de la suerte 19Z**

Relación	Ideal	Antes de aplicar compost	Después de aplicar compost	Deficiencia K
Ca/Mg	3 -- 5	0,96	1,23	
Ca/K	6 -- 8	46,65	35,49	>10
K/Mg	0,2 -- 0,3	0,02	0,04	<0,2
Mg/K	12 -- 18	49,30	42,17	>30
(Ca+Mg)/K	12 -- 20	95,95	77,66	>40

Fuente: Castro y Gómez, 2010.

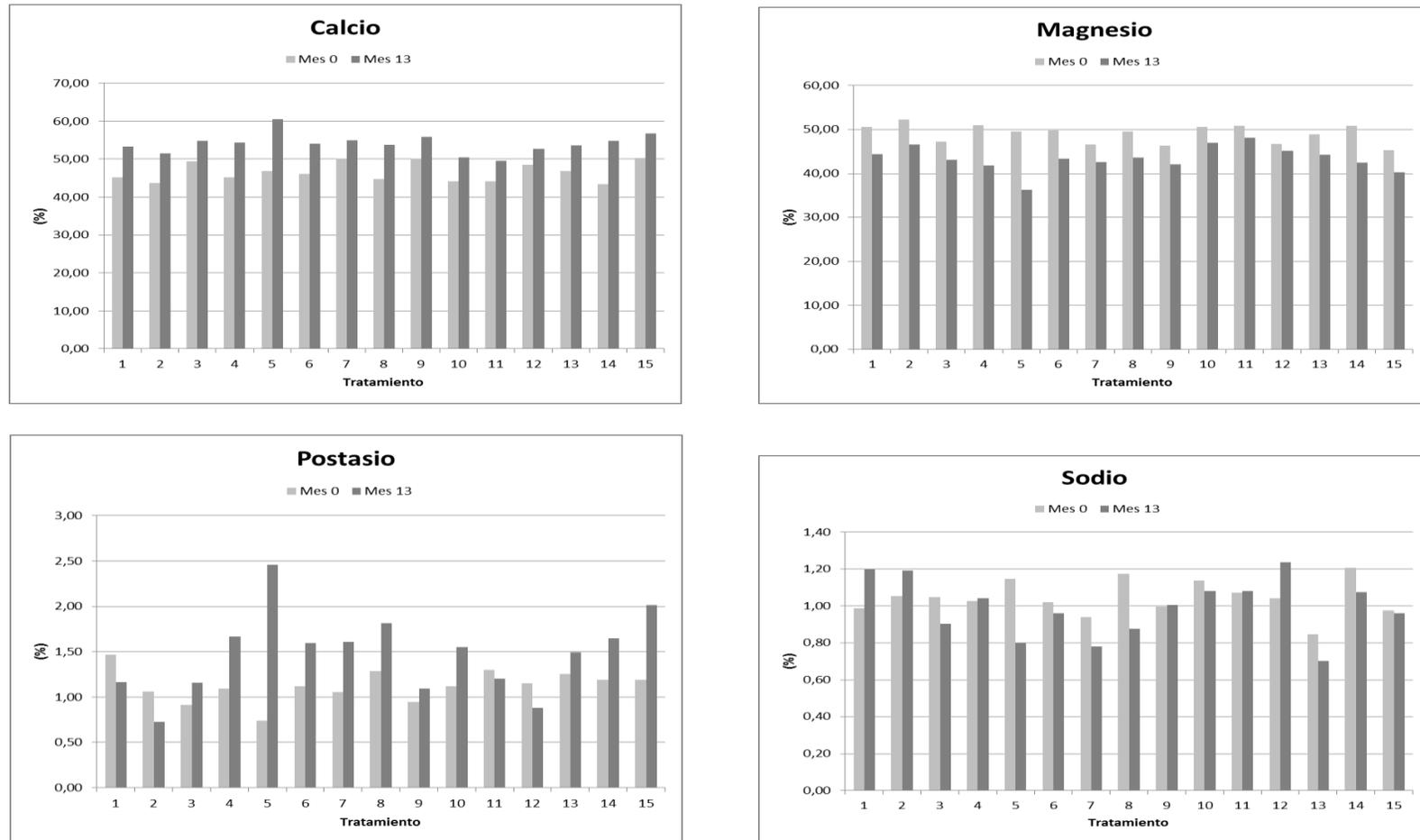


Figura 10. Efectos de la aplicación de compost sobre la saturación de bases del suelo *Chromic Endoaquerts* Horizonte Ap de la suerte 19Z

Por otra parte nutrientes como el P y S presentaron cambios significativos, para el P se presentaron con 40 t ha⁻¹ y los menores sin aplicación de compost, con respecto al S al no aplicar compost se obtuvo una mayor respuesta y la menor en 20 t ha⁻¹, estos resultados se consideran adecuados para el P (5 – 10 ppm) y bajos para el S (10 – 20 ppm) de acuerdo a lo reportado por Castro (2010).

El cambio en las poblaciones microbianas y su actividad mediante el aporte de compost puede generar cambios en P y S, para el caso del P se presentó una relación directa entre la dosis aplicada y la mayor presencia de este nutriente, procesos de mineralización (conversión de compuestos orgánicos a inorgánicos) y la alteración de la solubilidad de los compuestos inorgánicos del P, debida principalmente a los cambios de acidez, son de gran importancia para generar la liberación de cantidades apreciables de P disponible (Munévar, 2010).

Siendo entonces la segunda causa la que influyó de manera significativa en la disponibilidad de este nutriente, debido a la mayor neutralización de los grupos H⁺ en las arcillas y humus del suelo, por el aporte de CaOH y CaCO₃ en el compost.

El comportamiento del S fue diferente al P, pues no existió una relación entre dosis aplicada y disponibilidad del nutriente; y aunque la transformación de este elemento por la acción de los microorganismos en el proceso de mineralización también es efectuada, la dinámica es lenta e insuficiente para satisfacer la demanda de S por las planta en sistemas de cultivo intensivos (Munévar, 2010).

Además, las condiciones físicas adversas de este tipo de suelo, induce en época de lluvia a inundaciones, provocando que el ion SO₄ generado en el proceso de mineralización se reduzca a sulfuro por la misma actividad microbiana, proceso en el cual usan el oxígeno del sulfato para oxidar materiales orgánicos, los iones sulfuro sufren hidrolisis y se forma ácido sulfhídrico gaseosos y por lo tanto pasa a la atmosfera. Otro camino que puede tomar este ion, es lixiviarse en forma de Na₂SO₄.

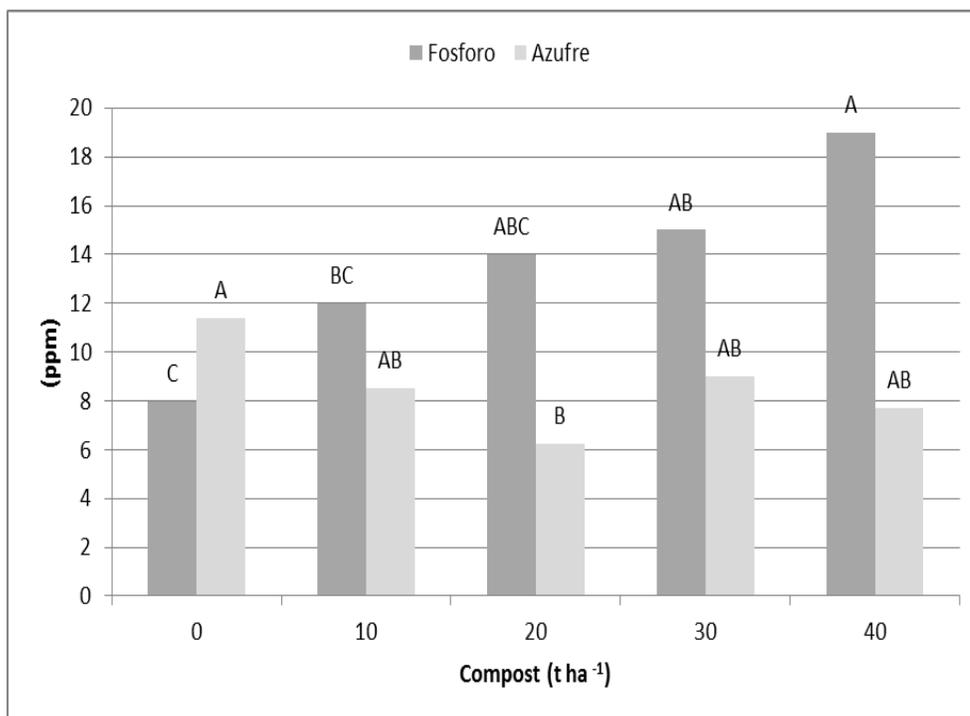


Figura 11. Variación de los contenidos de P y S después de la aplicación de compost del suelo Chromic Endoaquerts Horizonte Ap de la suerte 19Z

3.3.4 Cambios en las variables químicas por efecto de la interacción edad*dosis del compost

El Fe y Mn también son nutrientes influenciados por la actividad microbiana, presentando cambios significativos al aplicar compost en edad de 95 días para el Fe y menores a los 70 días (ver figura 12), con respecto al Mn el estado de madurez más avanzado 120 días género el mayor cambio, y el menor con 70 días. Por otra parte los cambios en dosis fueron significativos solo para el Mn, siendo mayor en 20 t ha⁻¹, y menor en 40 t ha⁻¹, estos resultados se consideran adecuados para el cultivo de caña de azúcar (20 - 40 ppm) en Mn y altos (40 – 80 ppm) para Fe, según las categorías establecidas por Cenicaña (Castro, 2010).

Cabe resaltar que el aporte de Fe y Mn por medio del abono presento cambios en el suelo, sin embargo, las condiciones iniciales del mismo fueron evidenciadas por los colores grises y azulosos típicos de suelos mal drenados debido a las formas reducidas de Fe, la fluctuación de nivel freático produce la solubilización del Mn al reducirse y su posterior re-oxidación es la responsable de la formación de las concreciones típicas de estos suelos (Mullen, 2005).

Por lo tanto, se espera que bajo estas condiciones los mayores aportes de compost presenten cambios en Fe y Mn, otro factor que influye de manera indirectamente es la acción de los microorganismos, mediante cambios en sus estados de óxido/reducción. El proceso de descomposición de la MO del suelo es un proceso de oxidación que se equilibra con la reducción de otros sustratos. En muchos casos el Fe se reduce de Fe^{+3} a Fe^{+2} y el Mn de Mn^{+4} a Mn^{+2} , como consecuencia indirecta de una activa descomposición de la materia orgánica y se favorece la disponibilidad para las plantas de estos dos elementos, pues las formas reducidas son más solubles que las oxidadas (Munévar, 2010).

Además de la descomposición de la MO, también los productos generados de este proceso, el humus se relaciona con el comportamiento obtenido, pues al correlacionar con investigaciones realizadas sobre la aplicación de enmiendas orgánicas y disponibilidad de Mn (Olego, et al., 2015), donde se mostró una afinidad de sorción de los ácidos húmicos por el Mn, y la capacidad de complejación orgánica de estas sustancias con el incremento de la cantidad de MO.

Por otra parte, los resultados mostraron que la mayor dosis de compost inhibió la disponibilidad del Mn, esto ha hecho suponer que el Mn se insolubiliza por la formación de complejos húmicos estables, como por el efecto de competencia que pueden provocar los microorganismos del suelo al contener este una considerable población microbiana, que precisa también de bioelementos esenciales como el Mn (Navarro, et al. 2013).

Los suelos arcillosos suelen mostrar tendencia a retener el Fe mediante un proceso de absorción, sin embargo, un contenido de materia orgánica apropiado en el suelo actúa favorablemente en el aprovechamiento de Fe, debido a que determinadas sustancias húmicas forman quelatos con el Fe en condiciones adversas de pH. Se ha comprobado que los ácidos húmicos pueden originar, con relativa facilidad, hidrosoles férrico-húmicos con el FeO , y con ellos favorecer su conservación en forma más asimilable (Navarro, et al. 2013).

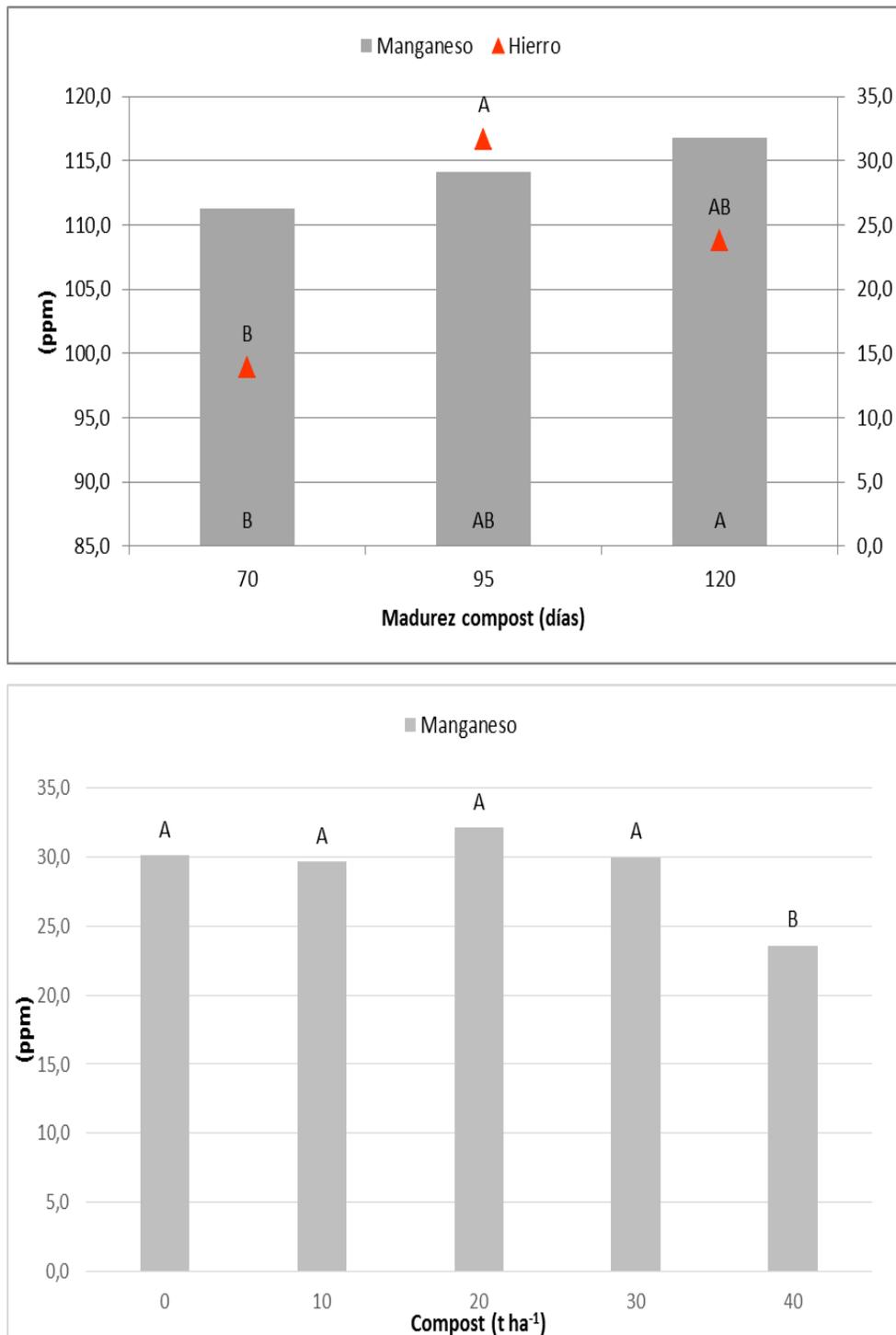


Figura 12. Variación de los contenidos de Fe y Mn después de la aplicación de compost del suelo *Chromic Endoaquerts* Horizonte Ap de la suerte 19Z

3.4 Contenido de nutrientes a nivel foliar del cultivo de caña de azúcar

El análisis de varianza muestra diferencias significativas ($p > 0,05$) en el tiempo fenológico del cultivo a los 3 meses en las variables Na y Mn, a los 6 meses en P, K y Zn en al menos dos niveles de dosis (Tabla 10).

Tabla 10. Análisis de varianza a nivel foliar de la variedad 01-1940 después de la aplicación compost

Tiempo	Variable de respuesta	Efecto		
		Edad	Dosis	Edad*Dosis
3 meses	Clorofila	0,98	0,49	0,74
	Elementos mayores (%)			
	N	0,91	0,75	0,72
	P	0,89	0,54	0,51
	Ca	0,22	1,00	0,63
	Mg	0,55	0,54	0,13
	K	0,98	0,50	0,33
	Na	0,89	0,11 *	0,44
	S	0,96	0,24	0,85
	B	0,35	0,40	0,98
	Elementos menores (ppm)			
	Cu	0,76	0,76	0,47
	Fe	0,84	0,94	0,98
	Mn	0,15	0,23 *	0,59
	Zn	0,47	0,81	0,36
6 meses	Clorofila	0,71	0,86	0,89
	Elementos mayores (%)			
	N	0,81	0,45	0,13
	P	0,33	0,15 *	0,21
	Ca	0,96	0,49	0,81
	Mg	0,92	0,36	0,95
	K	0,94	0,29 *	0,24
	Na	0,19	0,68	0,29
	S	0,55	0,19	0,55
	Elementos menores (ppm)			
	B	0,41	0,90	0,50
	Cu	0,84	0,57	0,49
	Fe	0,99	0,77	0,31
	Mn	0,68	0,58	0,25
	Zn	0,97	0,11 *	0,34

* p - valor $< 0,05$ se concluye diferencia entre al menos dos niveles

3.4.1 Extracción de nutrientes en el tejido foliar a los 3 meses

Como se evidencio en el suelo, el Na fue un nutriente que presento cambios al aplicar el compost, y a sí mismo en las hojas del cultivo, sin embargo, este elemento no es considerado como esencial para el para el desarrollo del cultivo, se relaciona con la apertura de estomas, balance hídrico y con la actividad de potasio; actúa también como activador enzimático de algunas reacciones (Subirós, 1995). Además, se debe resaltar que la concentración en la cual se encontró este nutriente en el abono fue de 0,3% y el valor máximo absorbido por la planta fue de 0,01%, lo que indica que el requerimiento por el cultivo no es alto y que dosis bajas satisfacen su necesidad. Los cambios significativos para Na se presentaron con la aplicación de compost de 10 t ha⁻¹, y los menores sin aplicación de compost (ver figura 13),

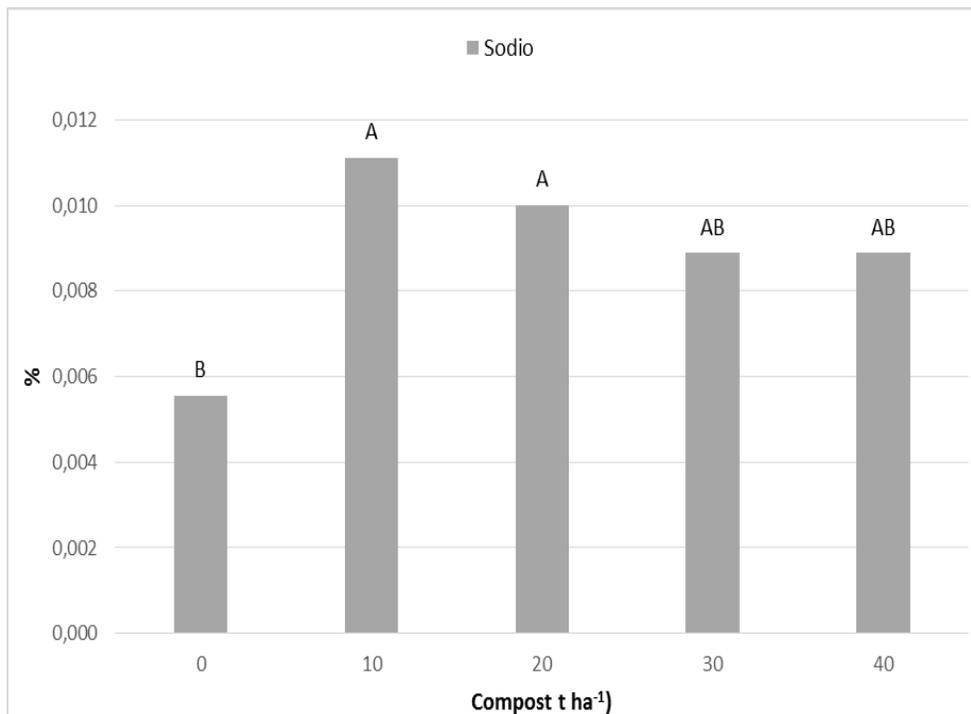


Figura 13. Variación de los contenidos de Na a nivel foliar de la variedad 01-1940 después de la aplicación compost

Tabla 11. Diferencias estadísticas en las variables de respuesta de crecimiento de la variedad 01-1940 a los 3 meses

Fuente de Variación		Elementos mayores (%)								Elementos menores (mg l ⁻¹)				
Edad	Dosis	Clorofila	N	P	Ca	Mg	K	Na	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn
70	0	36,97 αα	1,87 αα	0,22 αα	0,20 αα	0,18 αα	0,77 αα	0,007 β	1,58 αα	4,56 αα	39,60 αα	544,80 αα	361,19 α	80,17 αα
	10	33,63 αα	1,76 αα	0,21 αα	0,25 αα	0,22 αα	0,57 αα	0,010 α	1,05 αα	4,84αα	42,21 αα	551,40 αα	284,9 β	74,21 αα
	20	36,43 αα	1,82 αα	0,24 αα	0,21 αα	0,16 αα	0,62 αα	0,007 α	0,99 αα	5,10 αα	30,96 αα	573,96 αα	230,15 αβ	87,50 αα
	30	33,90 αα	1,76 αα	0,20 αα	0,23 αα	0,20 αα	0,71 αα	0,010 αβ	1,29 αα	4,91 αα	31,23 αα	548,89 αα	292,11 αβ	67,41 αα
	40	37,17 αα	1,87 αα	0,17 αα	0,22 αα	0,18 αα	0,58 αα	0,010 αβ	1,26 αα	4,69 αα	49,74 αα	609,49 αα	343,07αβ	66,89 αα
95	0	36,17 αα	1,91 αα	0,24 αα	0,27 αα	0,19 αα	0,70 αα	0,007 β	1,16 αα	5,17 αα	37,31 αα	585,96 αα	280,50 α	74,87 αα
	10	34,60 αα	1,82 αα	0,20 αα	0,22 αα	0,17 αα	0,65 αα	0,010 α	1,07 αα	5,20 αα	36,77 αα	673,11 αα	252,77 β	62,33 αα
	20	36,17 αα	1,80 αα	0,18 αα	0,24 αα	0,21 αα	0,55 αα	0,013 α	1,15 αα	5,67 αα	33,34 αα	627,89 αα	281,25 αβ	67,11 αα
	30	36,50 αα	1,82 αα	0,21 αα	0,25 αα	0,21 αα	0,72 αα	0,007 αβ	1,41 αα	4,84 αα	39,09 αα	513,90 αα	334,23 αβ	68,57 αα
120	40	35,37 αα	1,84 αα	0,22 αα	0,26 αα	0,23 αα	0,67 αα	0,007 αβ	1,33 αα	4,90 αα	34,74 αα	531,51 αα	345,71 αβ	70,50 αα
	0	34,97 αα	1,73 αα	0,21 αα	0,24 αα	0,16 αα	0,74 αα	0,003 β	1,20 αα	4,70 αα	34,61 αα	653,09 αα	312,12 α	69,67 αα
	10	34,90 αα	1,76 αα	0,22 αα	0,24 αα	0,20 αα	0,67 αα	0,013 α	1,10 αα	5,27 αα	38,07 αα	634,45 αα	194,07 β	62,46 αα
	20	34,80 αα	1,88 αα	0,23 αα	0,25 αα	0,21αα	0,75 αα	0,010 α	1,21 αα	5,16 αα	36,84 αα	581,10 αα	272,43 αβ	56,72 αα
	30	36,47 αα	1,88 αα	0,19 αα	0,22 αα	0,18 αα	0,48 αα	0,010 αβ	1,39 αα	4,91 αα	40,87 αα	619,39 αα	239,79 αβ	79,94 αα
	40	36,83 αα	1,87 αα	0,16 αα	0,23 αα	0,20 αα	0,66 αα	0,010 αβ	1,40 αα	4,91 αα	33,11 αα	533,56 αα	238,97 αβ	80,70 αα

Letras a, b corresponden a cambios en edad y α, β, γ corresponden a cambios en dosis.

Aunque el cultivo de caña requiere cantidades bajas de los elementos menores, la función en la actividad fisiológica del Mn en este cultivo está relacionada con la fotosíntesis y actividad enzimática (Quintero, 1995). De igual manera el Mn presentó cambios significativos en el suelo que se reflejaron en el tejido foliar, estos resultados muestran que sin la aplicación de compost se obtuvieron los cambios representativos; según estudios realizados por Cenicaña, reportado por Quintero (2008), se presentaron en plantilla contenidos de Mn foliar entre 51 y 88 ppm a la edad de 3 meses, este comportamiento se explica porque en los suelos del Valle del Cauca, la mayor deficiencia que se ha encontrado en los micronutrientes es en Fe, por otra parte los menores cambios fueron con 10 t ha^{-1} , estos resultados se consideran altos para todas las dosis (Figura 14).

Además, se observa una relación directa entre la dosis de compost aplicada y extracción de este nutriente, como se mencionó anteriormente este comportamiento se asocia con el mayor aporte de poblaciones microbianas, que generan mayor descomposición de la MO y a su vez cambios en el proceso de óxido-reducción que permiten la disponibilidad de este nutriente.

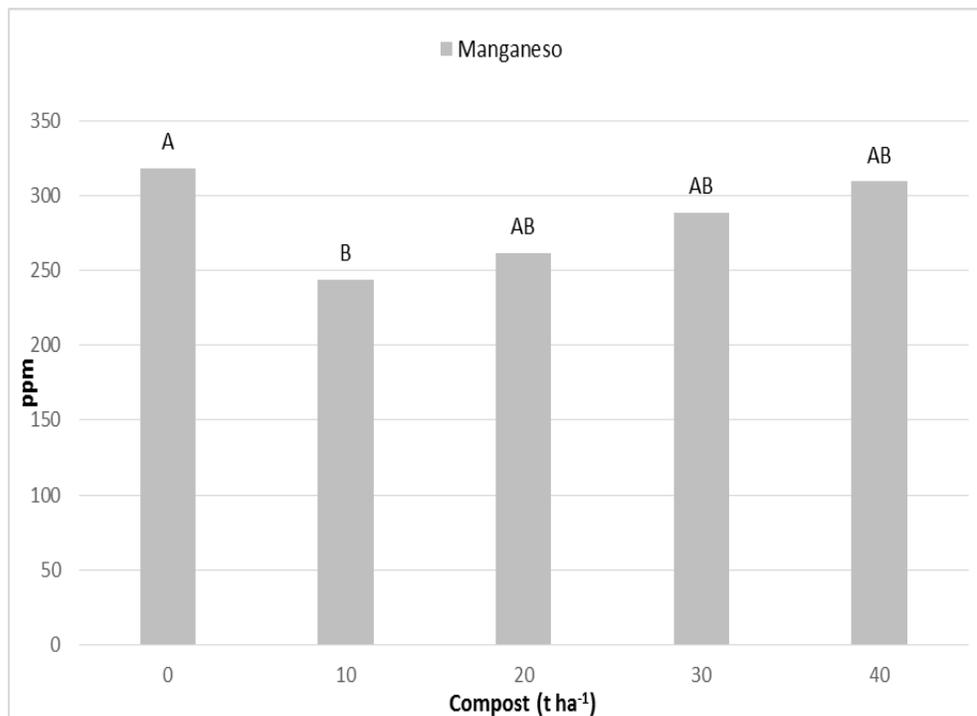


Figura 14. Variación de los contenidos de Mn a nivel foliar de la variedad 01-1940 después de la aplicación compost

3.4.2 Extracción de nutrientes en el tejido foliar a los 6 meses

El K es el nutriente más extraído por el cultivo de caña de azúcar, es necesario para el metabolismo de los carbohidratos, la síntesis de proteínas, el control y la regulación de las actividades de varios elementos esenciales. Sin embargo, la disponibilidad presentada en el suelo no se reflejó en la extracción del nutriente en las hojas. Los valores más significativos se observaron con 10 t ha⁻¹ de compost y los menores con 20 t ha⁻¹ (ver figura 15), estos resultados se consideran bajos (<1,2%) en todas las dosis evaluadas de acuerdo a Quintero (1995).

Estos resultados son una consecuencia del desbalance de bases existente en este Vertisol, aunque se comprobó por medio de este estudio que el aporte de Ca en el compost logro una modificación en la relación de estos nutrientes en el complejo de cambio, la mayor concentración de iones Ca y Mg disminuyen la disponibilidad y absorción de K (Navarro, *et al.* 2013).

Otro factor a considerar es que la caña de azúcar puede sufrir deficiencia de K aún en suelos que reportan altos contenidos de este elemento. Especialmente si estos suelos son del tipo pesado (arcillosos), con poca estructura, de alta densidad o compactación debida al tráfico de equipo agrícola y con cantidades relativamente altas de Ca y/o alta saturación de Na.

El P junto al N, son los dos nutrientes con mayor respuesta de este cultivo, es un elemento constituyente de los ácidos nucleicos, de los fosfolípidos y del adenosin trifosfato (ATP), además es esencial en la síntesis de clorofila y está relacionado con la formación de sacarosa. Su mayor extracción fue coherente con la mayor disponibilidad en el suelo, presentando cambios significativos con 40 t ha⁻¹ y menor con 30 t ha⁻¹, estos resultados se consideran adecuados (0,20 a 0,25%), según Quintero (1995), los resultados de investigaciones solo han mostrado una ligera tendencia a incrementar la producción por la aplicación de este nutriente, aunque en algunos suelos se han observado el incremento en el contenido P en las hojas de caña de azúcar como resultado de la aplicación de este nutrimento, no se ha encontrado relación entre los contenidos foliares y la producción de caña de azúcar por hectárea.

Tabla 12. Diferencias estadísticas en las variables de respuesta de crecimiento de la variedad 01-1940 a los 6 meses

Fuente de Variación		Elementos mayores (%)								Elementos menores (mg l ⁻¹)				
Edad	Dosis	Clorofila	N	P	Ca	Mg	K	Na	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn
70	0	36,47 αα	1,33 αα	0,19 αβ	0,29 αα	0,10 αα	0,40 αβ	0,003 αα	0,37 αα	7,43 αα	14,78 αα	157,40 αα	61,83 αα	6,59 αβ
	10	37,23 αα	1,19 αα	0,17 αβ	0,13 αα	0,05 αα	0,98 α	0,010 αα	0,20 αα	6,69 αα	7,88 αα	110,39 αα	102,68 αα	10,66 α
	20	37,40 αα	1,19 αα	0,23 αβ	0,24 αα	0,05 αα	0,47 β	0,007 αα	0,62 αα	6,98 αα	16,86 αα	146,17 αα	77,84 αα	10,50 αβ
	30	37,13 αα	1,18 αα	0,16 β	0,20 αα	0,08 αα	0,66 αβ	0,010 αα	0,52 αα	7,02 αα	5,62 αα	127,86 αα	165,23 αα	8,00 β
	40	36,20 αα	1,30 αα	0,22 α	0,23 αα	0,10 αα	0,27 αβ	0,010 αα	0,47 αα	6,69 αα	3,12 αα	217,43 αα	88,49 αα	5,74 β
95	0	37,43 αα	1,30 αα	0,20 αβ	0,18 αα	0,10 αα	0,73 αβ	0,003 αα	0,30 αα	7,20 αα	1,92 αα	167,27 αα	61,87 αα	11,77 αβ
	10	36,10 αα	1,20 αα	0,22 αβ	0,21 αα	0,06 αα	0,39 α	0,010 αα	0,44 αα	6,47 αα	1,69 αα	183,88 αα	71,31 αα	8,53 α
	20	36,70 αα	1,22 αα	0,19 αβ	0,22 αα	0,07 αα	0,50 β	0,007 αα	0,42 αα	6,85 αα	1,55 αα	158,43 αα	105,30 αα	7,59 αβ
	30	36,97 αα	1,21 αα	0,20 β	0,20 αα	0,08 αα	0,56 αβ	0,007 αα	0,92 αα	6,92 αα	5,59 αα	132,10 αα	48,59 αα	7,01 β
120	40	37,73 αα	1,18 αα	0,24 α	0,24 αα	0,05 αα	0,58 αβ	0,003 αα	0,65 αα	7,41 αα	5,60 αα	124,55 αα	82,26 αα	8,01 β
	0	40,27 αα	1,14 αα	0,20 αβ	0,21 αα	0,09 αα	0,47 αβ	0,043 αα	0,58 αα	5,85 αα	15,10 αα	155,62 αα	38,76 αα	8,11 αβ
	10	37,03 αα	1,27 αα	0,18 αβ	0,16 αα	0,06 αα	0,82 α	0,010 αα	0,36 αα	6,84 αα	5,59 αα	111,50 αα	40,92 αα	13,13 α
	20	37,20 αα	1,40 αα	0,21 αβ	0,24 αα	0,06 αα	0,23 β	0,007 αα	0,57 αα	6,97 αα	1,75 αα	173,27 αα	69,13 αα	7,25 αβ
40	30	36,13 αα	1,15 αα	0,20 β	0,25 αα	0,10 αα	0,46 αβ	0,010 αα	0,99 αα	6,51 αα	18,35 αα	176,56 αα	53,79 αα	7,04 β
	40	37,70 αα	1,26 αα	0,20 α	0,24 αα	0,08 αα	0,61 αβ	0,010 αα	0,42 αα	6,98 αα	19,08 αα	153,43 αα	50,48 αα	6,15 β

Letras a, b corresponden a cambios en edad y α, β, γ corresponden a cambios en dosis.

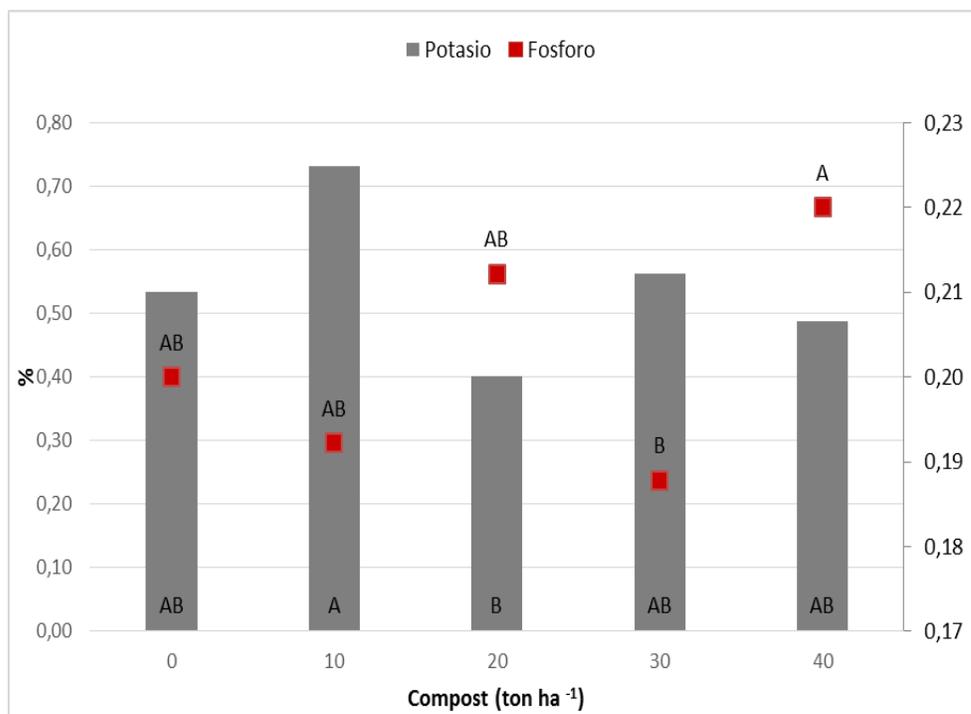


Figura 15. Variación de los contenidos de K y P a nivel foliar de la variedad 01-1940 después de la aplicación compost

Este comportamiento es consecuencia de la reacción de los aniones fosfato con los minerales del suelo, lo cuales están gobernados por dos cinéticas, una rápida (absorción) y otra lenta (difusión vía partícula) por lo que queda solo una fracción del nutriente aplicado de forma disponible para el cultivo. Por esta razón, es común que se considere que el P es de baja disponibilidad o incluso de escasa solubilidad (Navarro, *et al.* 2013).

Otro elemento que presento cambios en el tejido foliar pero no en su disponibilidad en el suelo fue el Zn, siendo los valores más altos con la aplicación de 10 t ha⁻¹ y los menores con 30 y 40 t ha⁻¹, el Zn al igual que el K presento diferencias significativas con la menor dosis de compost y se observó que al aumentar la dosis su presencia en el tejido foliar disminuyo, se conoce que este elemento se requiere en bajas cantidades en esta planta; rangos de niveles edáficos que correlacionan con las exigencias físico-nutricionales, exponen un rango de este micronutriente entre 1,3 – 3,0 ppm, al comparar este resultado con el obtenido en la lámina foliar en las dosis significativa, la cual fue de 10,78 ppm, el valor está por encima del requerimiento nutricional, sin embargo se ha encontrado que en suelos cultivados en Mollisoles, Inceptisoles y Vertisoles que en la variedad MZC 74-275 el contenido de este elemento vario entre 11 y 14 ppm (Quintero, 1995).

Además, como se expuso anteriormente para el Mn, la deficiencia que presentan los suelos del Valle del Cauca se ha presentado en Fe, por lo tanto, sino se realizara aplicaciones de este nutriente, las mismas condiciones del suelo suplen las necesidades de este micronutriente.

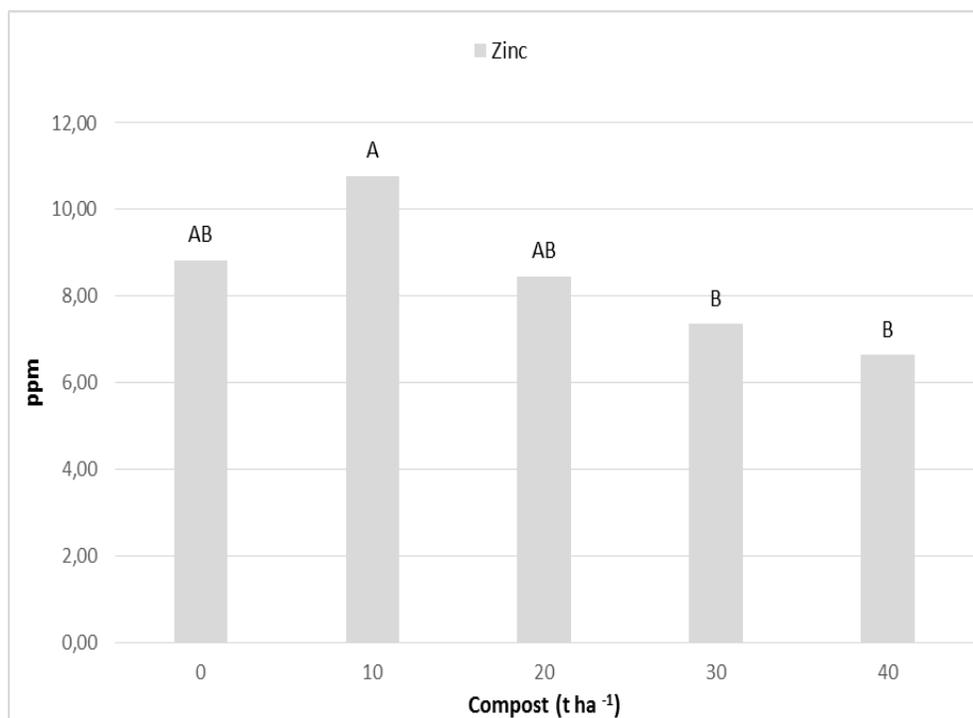


Figura 16. Variación de los contenidos de Zn a nivel foliar de la variedad 01-1940 después de la aplicación compost

3.5 Efecto de la aplicación de compost sobre el crecimiento y la productividad del cultivo de caña de azúcar

El análisis de varianza mostró diferencias significativas ($p > 0,05$) en las variables de respuesta del crecimiento del cultivo, altura y población a los 3 meses, y altura y diámetro a los 6 meses en al menos dos niveles de dosis, sin embargo, estos cambios no se reflejaron en TCH y TSH (tabla 13).

Tabla 13. Análisis de varianza para las variables de crecimiento y productividad de la variedad 01-1940 después de la aplicación compost

Tiempo	Variable de respuesta	Efecto		
		Edad	Dosis	Edad*Dosis
3 meses	Población	0,61	0,22 *	0,62
	Altura	0,47	0,18 *	0,90
	Diámetro	-	-	-
6 meses	Población	0,43	0,78	0,96
	Altura	0,77	0,05 *	0,73
	Diámetro	0,75	0,09 *	0,95
13 meses	TCH	0,88	0,57	0,95
	Sacarosa	0,20	0,51	0,40
	TSH	0,90	0,56	0,92

* p - valor <0,05 se concluye diferencia entre al menos dos niveles

3.5.1 Crecimiento del cultivo a los 3 y 6 meses

La temperatura y la humedad son dos factores que afectan directamente el desarrollo de la caña de azúcar, por lo tanto, la importancia de conocer el comportamiento de la precipitación y evaporación en la época de ensayo, datos obtenidos de Cenicaña en la estación los naranjos (ver figura 17).

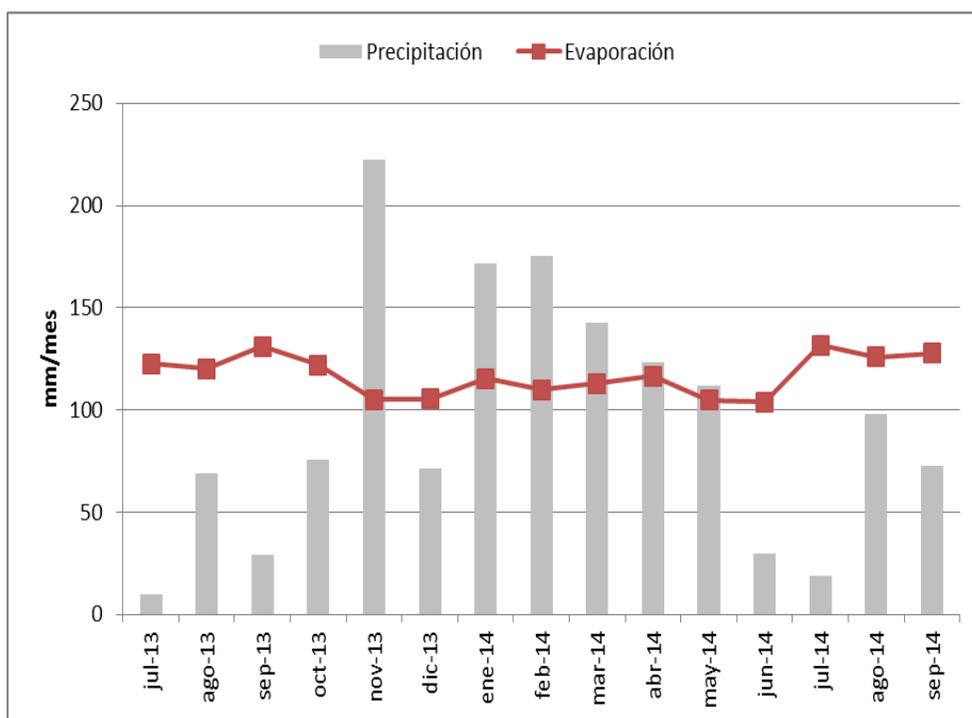


Figura 17. Comportamiento de las condiciones climáticas en el periodo de desarrollo de la variedad 01-1940

El rango óptimo de temperatura para el crecimiento se encuentra entre los 26 y 30°C, las temperaturas inferiores a los 21°C retardan el crecimiento de los tallos y conducen al aumento de sacarosa. En cuanto a la humedad, su déficit o exceso pueden tener efectos perjudiciales en el cultivo; la falta de humedad en el suelo puede afectar en forma significativa a la producción de biomasa; aunque, si se presenta en las últimas etapas del cultivo, afecta el desarrollo de la planta, pero incrementa el contenido de sacarosa en los tallos. Excesos de humedad detienen el crecimiento radicular, así como impiden una normal absorción de nutrientes básicos para la planta.

Los resultados obtenidos para el número de tallos por parcela o población, mostró cambios significativos a los 3 meses de crecimiento, presentando los mayores valores con la aplicación de 40 t ha⁻¹ y los menores con 20 t ha⁻¹, estos resultados se consideran bajos para todas las dosis; la variedad 01-1940 fue creada para tener un macollamiento entre 9 – 13 tallos por cepa, el valor máximo obtenido fue de 7,7 tallos, y aunque se evidencio que a los 6 meses se presentó aumento en esta variable de respuesta, los cambios no son significativos (Figura 18), Subiros (1995) ha reportado que la caña de azúcar requiere en los tres primeros meses de N para un adecuado macollamiento, estudios realizados por Delgado *et al.*, 2015, se concluyó que para un sistema orgánico los mejores resultados de fertilización nitrogenada se vieron reflejando en TCH al aplicar 107.15 Kg ha⁻¹ y un contenido de MO del 1,76%, al comparar estos resultados con las cantidades aplicadas en este ensayo en el 3ro y 4to mes de crecimiento fue de 92 Kg ha⁻¹ equivalente a 184 Kg ha⁻¹, obteniendo una productividad menor, este menor rendimiento es condicionado por la textura arcillosa, debido a que la humedad alojada en los micrositos del espacio poroso asociado a las fuertes lluvias que se presentaron entre el mes de noviembre de 2013 y marzo de 2014, como se observa en la figura 17, donde la precipitación fue mayor que la evapotranspiración, fomenta la actividad de la biomasa microbiana anaerobia y acelera la reducción de nitratos, transformándose a compuestos gaseosos como oxido nitroso y nitrógeno molecular, perdiéndose hacia la atmosfera, proceso que se conoce como desnitrificación (Labrador, 2002).

Tabla 14. Diferencias estadísticas en las variables de respuesta de crecimiento del cultivo y productividad de la variedad 01-1940

Fuente de Variación		Población (# tallos)		Altura (cms)		Diámetro (cms)	TCH	Sacarosa	TSH
Edad	Dosis	3 meses	6 meses	3 meses	6 meses	6 meses		13 meses	
70	0	6,37 αβ	8,07 αα	31,87 αβ	143,27 β	2,73 αβ	44,70 αα	16,92 αα	7,64 αα
	10	5,97 αβ	7,73 αα	30,73 β	133,87 β	2,62 β	48,93 αα	17,05 αα	8,14 αα
	20	5,60 β	9,20 αα	30,37 αβ	162,70 α	2,84 α	49,17 αα	16,53 αα	7,82 αα
	30	7,43 αβ	7,77 αα	33,67 α	144,57 αβ	2,68 αβ	47,07 αα	17,62 αα	8,15 αα
	40	7,80 α	8,33 αα	31,67 αβ	170,43 α	2,80 α	49,87 αα	16,23 αα	7,94 αα
95	0	6,80 αβ	8,27 αα	32,67 αβ	146,60 β	2,75 αβ	45,30 αα	16,25 αα	7,32 αα
	10	6,67 αβ	7,63 αα	30,50 β	152,03 β	2,73 β	41,37 αα	16,26 αα	6,50 αα
	20	6,1 β	7,93 αα	33,77 αβ	161,03 α	2,80 α	41,43 αα	16,93 αα	7,20 αα
	30	5,93 αβ	8,13 αα	34,37 α	158,10 αβ	2,78 αβ	46,37 αα	16,75 αα	7,71 αα
	40	7,17 α	8,93 αα	33,73 αβ	153,47 α	2,76 α	51,87 αα	17,37 αα	9,11 αα
120	0	5,13 αβ	8,53 αα	29,73 αβ	137,00 β	2,77 αβ	33,13 αα	16,79 αα	5,61 αα
	10	8,30 αβ	7,93 αα	30,10 β	140,20 β	2,64 β	51,10 αα	17,42 αα	8,77 αα
	20	6,43 β	9,83 αα	33,73 αβ	164,77 α	2,85 α	46,87 αα	17,00 αα	7,76 αα
	30	7,53 αβ	10,52 αα	33,43 α	171,60 αβ	2,74 αβ	45,63 αα	17,52 αα	7,78 αα
	40	8,13 α	8,80 αα	33,13 αβ	167,27 α	2,81 α	56,97 αα	17,38 αα	9,77 αα

Letras a, b corresponden a cambios en edad y α, β, γ corresponden a cambios en dosis.

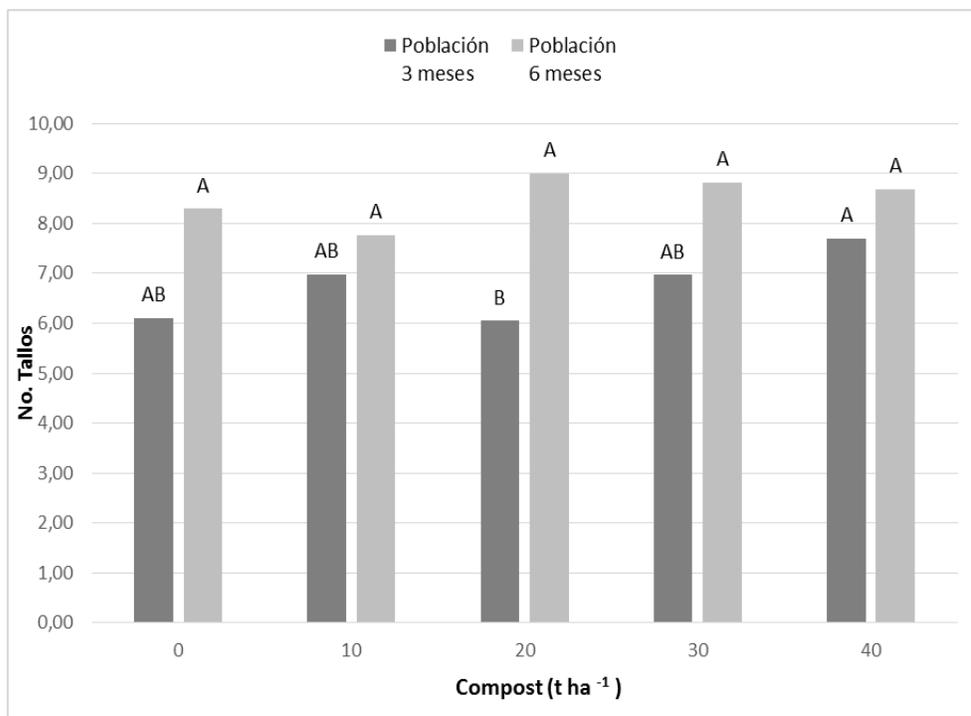


Figura 18. Variación en la población de la variedad 01-1940 después de la aplicación compost

La altura presentó cambios significativos tanto a los 3 y 6 meses de crecimiento (Figura 18), el desarrollo de los tallos, entre el cuarto y séptimo mes es rápido, el cual disminuye a medida que aumenta la edad del cultivo. En esta etapa, se ha observado que el déficit de agua causa una disminución significativa en el alargamiento de los tallos (Moore, 1987). Sin embargo en esta etapa de máxima elongación se presentó altas precipitaciones, que beneficiaron la respuesta a la aplicación de compost con 30 t ha⁻¹ y los menores con 10 t ha⁻¹ a los 3 meses, de igual forma ocurrió al cumplir 6 meses, 40 t ha⁻¹ obtuvo el cambio más significativo, y el menor con 10 t ha⁻¹.

Este suelo está clasificado como 5H5, de acuerdo a Gómez et al., (2007), el nivel de humedad de este suelo es muy alto (>600 mm), siendo suelos de textura muy fina que se encharcan en épocas lluviosas, limitados por escasa profundidad y encharcamientos periódicos. Sin embargo, al comparar los valores obtenidos (165 cm) con lo reportado por Unigarro et al. (2013) donde se evaluaron 13 variedades de caña de azúcar en condiciones de alta humedad, se obtuvieron valores de altura de 1,54 a 2,23 m antes de cosecha, se evidencia resultados similares, pues este comportamiento está influenciado por la variedad 01-1940, resistente a este tipo de condiciones.

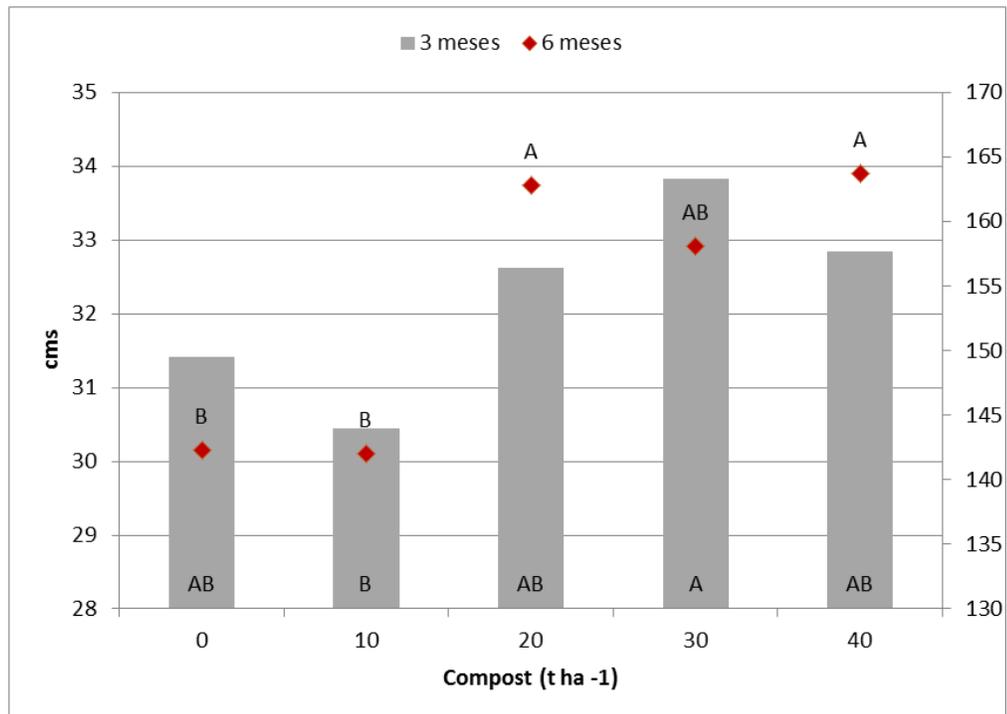


Figura 19. Variación en la altura de la variedad 01-1940 después de la aplicación compost

Otra variable agronómica evaluada fue el diámetro del tallo, que presenta los mayores valores con 20 t ha⁻¹ y los menores con 10 t ha⁻¹, estos resultados se consideran normales, pues al comparar los resultados con los obtenidos con estudios realizados por Urringo *et al.*, (2013), los valores de diámetro estuvieron entre 2.36 y 2.97 cms, lo cual indica resultados adecuados en esta variable.

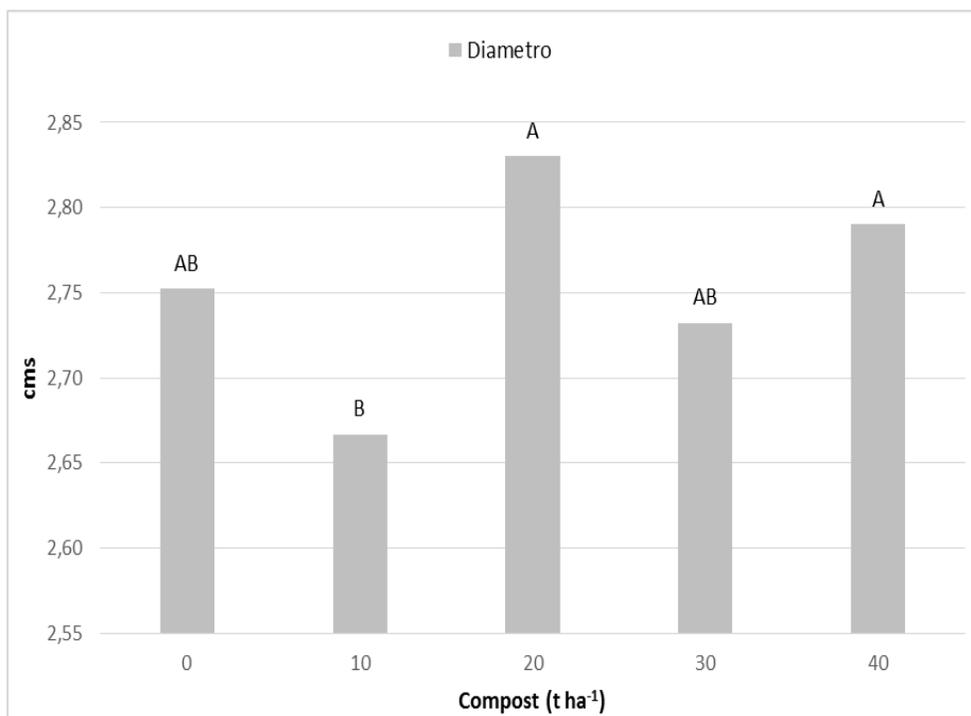


Figura 20. Variación en el diámetro de la variedad 01-1940 después de la aplicación compost

3.5.2 Productividad del cultivo de caña de azúcar

El aporte de compost en el desarrollo del cultivo mostró beneficios al aplicar altas dosis, sin embargo los cambios no fueron significativos estadísticamente en los indicadores de productividad TCH y TSH.

Los resultados en la variable población no fueron adecuados con respecto a lo esperado para la variedad 01-1940, aunque el objetivo fue utilizar una cepa tolerante a la humedad los resultados estuvieron por debajo del valor teórico del macollamiento, estudios realizado por Viveros, *et al.* (2014), permitieron aclarar que el TCH presenta una alta

correlación con la población y el diámetro del tallo, lo que indica que el efecto directo es alto y confirma que para lograr una alta producción de caña de azúcar se requieren altas poblaciones de plantas y diámetro de tallo grueso, lo que coincide con los hallazgos de Pagano et al. (2012).

Sin embargo, es importante resaltar que entre la dosis más alta y el testigo se presentó una diferencia que correspondió a 12 t, efecto que se ha reportado en estudios realizados por Cenicaña e Ingenio Risaralda donde concluyeron un efecto positivo en la aplicación de compost en TCH en zonas donde los suelos presentan problemas de alta saturación de humedad debido a drenaje interno deficiente. La aplicación de compost en estas zonas incremento en 15% la TCH, lo cual equivale en promedio a 18 t ha⁻¹ comparada con el área no aplicada.

El valor máximo para esta variable fue de 53 t ha⁻¹, lo cual está por debajo del indicador (115 t ha⁻¹) en TCH manejado en el ingenio del cauca, por otra parte, datos de productividad históricos en esta suerte muestran que en el primer corte se obtuvieron valores promedio de 81 t ha⁻¹, estos resultados fueron influenciados indudablemente por las condiciones climáticas y el tipo de suelo. En este ensayo se presentó entre julio y octubre de 2013 déficit de agua (ver figura 17) que redujo el número de tallos afectando la etapa de macollamiento y se presentó nivel freático elevado entre las épocas de noviembre de 2013 y marzo de 2014, temporada de mayor precipitación que afecta la óptima absorción de nutrientes, siendo afectados por procesos de lixiviación y transformación microbiológica.

Aunque el indicador TSH no mostro diferencias significativas (ver figura 22) entre los tratamientos planteados, los valores obtenidos están dentro del rango reportado por Cenicaña, (6 – 29 t ha⁻¹), estos valores se consideran bajos, siendo efecto de la baja productividad obtenida en TCH y no en porcentaje de sacarosa, los cuales estuvieron entre 16.65 y 17.29% (ver tabla 14), ubicándose dentro del rango de 10 – 16% mencionados por Cenicaña; estudios realizados por Viveros, *et al.* (2014), corrobora este comportamiento, existe entre la población de plantas una correlación negativa con sacarosa (%caña), lo que genera una limitante entre incremento de TCH y sacarosa y también limita el eficiente desempeño del Programa de Variedades de Cenicaña en la zona semiseca del valle del río Cauca.

La altura de planta como determinante de TCH y sacarosa (%caña) es importante, pero su efecto ocurre a través del diámetro de tallo, esto significa que cuando se seleccionan plantas altas éstas deben tener diámetros gruesos, ya entre ambas características existe asociación (Viveros, *et al.* 2014).

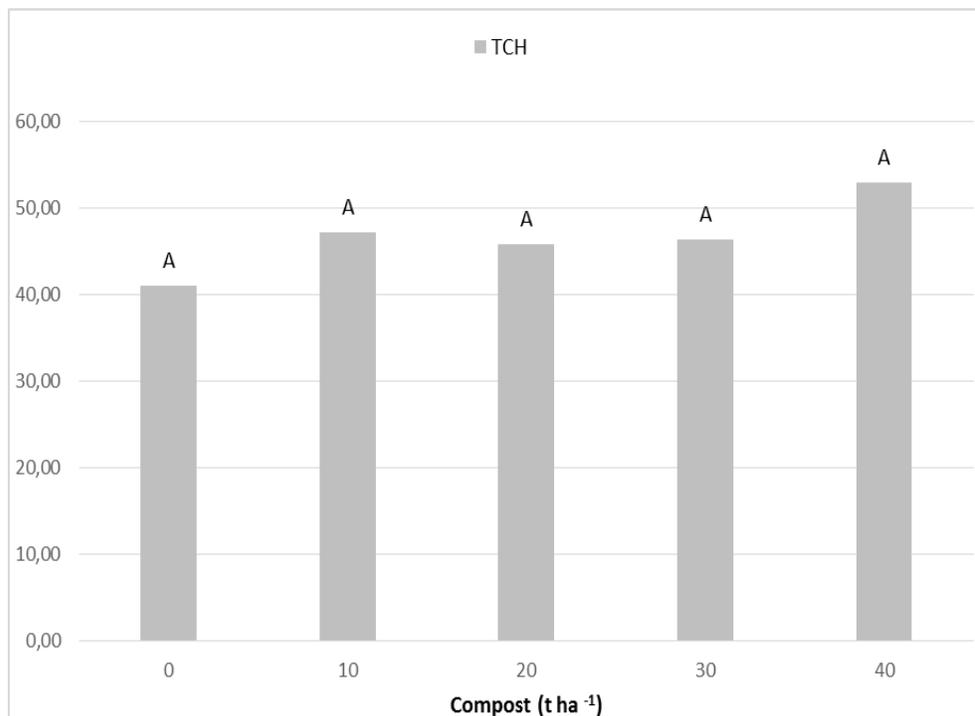


Figura 21. TCH alcanzado por la variedad 01-1940 después de la aplicación compost

El contenido de sacarosa en las condiciones del Valle del río Cauca es variable a través del tiempo debido a que la cosecha se realiza durante todo el año, viéndose afectada por la precipitación y la temperatura de cada época del año, lo que afecta directamente la concentración de sacarosa en la planta al momento de su cosecha.

Como se mencionó anteriormente el déficit de agua afecta durante los últimos meses el desarrollo del cultivo ya que favorece el angostamiento, frenando el crecimiento y aumentando el contenido de sacarosa, condición que se dio en los últimos meses en este experimento donde la evaporación fue mayor que la precipitación.

Además se debe tener en cuenta que la productividad del cultivo también está condicionado por factores como: profundidad efectiva, salinidad, compactación,

pedregosidad, hidromorfía, y erosión, según Cuéllar *et al.*, (2002). De estos factores los que se observan de manera notoria en suelos arcillosos son profundidad efectiva, compactación e hidromorfía, afectando el adecuado desarrollo del cultivo de caña de azúcar.

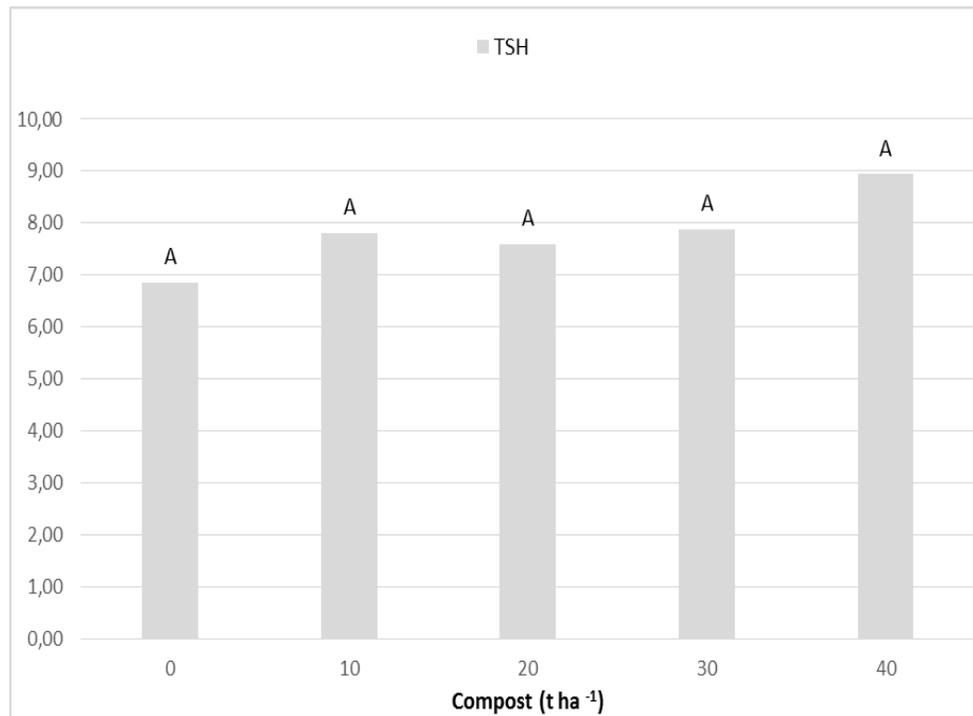


Figura 22. TSH alcanzado por la variedad 01-1940 después de la aplicación compost

4. Conclusiones

- Mayor cantidad de aplicación de compost, generado a partir de residuos de la industria azucarera, incrementa la estabilidad de los agregados (0,5 mm) en Vertisoles en época de renovación, beneficiando la estructura del suelo, particularmente los macroagregados.
- La aplicación de compost mejora la disponibilidad de algunos elementos, sin embargo, no supe la necesidad total de los nutrientes que requiere el cultivo de caña de azúcar en este tipo de suelo.
- Compost maduros amortiguan los cambios de acidez en el suelo y forman compuestos estables, compost menos maduros como el producido en Incauca, continua su transformación en el campo disminuyendo los contenidos de MO en el suelo.
- Altas dosis de compost impactan positivamente en las variables agronómicas del cultivo de caña de azúcar, reflejándose en mayores contenidos de TCH y TSH.

Anexo A: Determinación de Boro en suelo, método propuesto por el laboratorio de campo Ingenio Providencia.

El extracto se obtuvo pesando 20 g de suelo y agregando 35 ml de la solución extractora de fosfato de calcio, se colocó en agitación durante 30 minutos, se filtró la solución, el filtrado constituyó el extracto sobre el cual se determinó el Boro disponible en el suelo.

* Determinación: Método Colorimétrico de Azometina-H.

Se transfirió una alícuota de 5 ml del extracto a un recipiente plástico y se adicionó 4 ml de la solución buffer de pH 5 y se mezcló. Se adicionó 2 ml de la solución de Azometina-H, y se homogenizó. Se dejó en reposo durante 45 minutos, y después de este tiempo se leyeron las absorbancias en el espectrofotómetro UV/VIS a 430 nm.

El contenido de boro se expresó en ppm (mg/L) y se calculó a partir de los ppm (mg/L) del elemento en la solución muestra. Se aplicó la fórmula:

$$B \text{ suelo (ppm ó mg/kg)} = B \text{ solución ppm (mg/L)} \times F.D.$$

En donde:

$$FD = \frac{25ml \text{ de solución final}}{10g \text{ Suelo}} = 2.5$$

Anexo B: Análisis de varianza de las variables estadísticamente significativas

1. Variables físicas del suelo.

Variable: estabilidad de agregados (0,5 mm)

Type III Tests of Fixed Effects					
Effect	Num DF	Den DF	F Value	Pr > F	
blq	2	28	0.36	0.7007	
edcomp	2	28	0.01	0.9925	
doscomp	4	28	1.21	0.3270	
edcomp*doscomp	8	28	3.19	0.0106	

2. Variables químicas del suelo.

Variable: pH

Type III Tests of Fixed Effects					
Effect	Num DF	Den DF	F Value	Pr > F	
blq	2	28	0.88	0.4243	
edcomp	2	28	3.27	0.0531	
doscomp	4	28	0.29	0.8789	
edcomp*doscomp	8	28	0.96	0.4875	

Variable: materia orgánica

Type III Tests of Fixed Effects					
Effect	Num DF	Den DF	F Value	Pr > F	
blq	2	28	1.15	0.3316	
edcomp	2	28	2.34	0.1146	
doscomp	4	28	0.51	0.7258	
edcomp*doscomp	8	28	0.69	0.6964	

Variable: Hierro

Type III Tests of Fixed Effects				
Effect	Num DF	Den DF	F Value	Pr > F
blq	2	28	5.76	0.0080
edcomp	2	28	2.58	0.0935
doscomp	4	28	0.77	0.5542
edcomp*doscomp	8	28	0.31	0.9541

Variable: Magnesio

Type III Tests of Fixed Effects				
Effect	Num DF	Den DF	F Value	Pr > F
blq	2	28	7.58	0.0023
edcomp	2	28	0.98	0.3867
doscomp	4	28	1.89	0.1408
edcomp*doscomp	8	28	1.38	0.2483

Variable: Potasio

Type III Tests of Fixed Effects				
Effect	Num DF	Den DF	F Value	Pr > F
blq	2	28	1.04	0.3660
edcomp	2	28	0.15	0.8595
doscomp	4	28	2.08	0.1099
edcomp*doscomp	8	28	1.26	0.3051

Variable: Sodio

Type III Tests of Fixed Effects				
Effect	Num DF	Den DF	F Value	Pr > F
blq	2	28	0.73	0.4892
edcomp	2	28	0.32	0.7297
doscomp	4	28	1.65	0.1905
edcomp*doscomp	8	28	0.74	0.6575

Variable: Fosforo

Type III Tests of Fixed Effects					
Effect	Num DF	Den DF	F Value	Pr > F	
blq	2	28	5.61	0.0089	
edcomp	2	28	0.41	0.6661	
doscomp	4	28	3.56	0.0181	
edcomp*doscomp	8	28	0.97	0.4807	

Variable: Azufre

Type III Tests of Fixed Effects					
Effect	Num DF	Den DF	F Value	Pr > F	
blq	2	18	10.20	0.0011	
edcomp	2	18	1.18	0.3287	
doscomp	4	18	2.64	0.0679	
edcomp*doscomp	8	18	1.94	0.1162	

Variable: Manganeso

Type III Tests of Fixed Effects					
Effect	Num DF	Den DF	F Value	Pr > F	
blq	2	28	14.46	<.0001	
edcomp	2	28	3.51	0.0436	
doscomp	4	28	2.82	0.0441	
edcomp*doscomp	8	28	0.64	0.7386	

3. Variables químicas del tejido foliar (3 meses).

Variable: Sodio

Type III Tests of Fixed Effects					
Effect	Num DF	Den DF	F Value	Pr > F	
blq	2	28	0.48	0.6221	
edcomp	2	28	0.12	0.8868	
doscomp	4	28	2.11	0.1058	
edcomp*doscomp	8	28	1.03	0.4402	

Variable: Manganeso

Type III Tests of Fixed Effects				
Effect	Num DF	Den DF	F Value	Pr > F
blq	2	28	0.02	0.9828
edcomp	2	28	2.07	0.1456
doscomp	4	28	1.51	0.2259
edcomp*doscomp	8	28	0.82	0.5891

4. Variables químicas del tejido foliar (6 meses).

Variable: Fosforo

Type III Tests of Fixed Effects				
Effect	Num DF	Den DF	F Value	Pr > F
blq	2	28	0.27	0.7618
edcomp	2	28	1.15	0.3310
doscomp	4	28	1.81	0.1547
edcomp*doscomp	8	28	1.48	0.2096

Variable: Potasio

Type III Tests of Fixed Effects				
Effect	Num DF	Den DF	F Value	Pr > F
blq	2	28	2.39	0.1098
edcomp	2	28	0.06	0.9383
doscomp	4	28	1.32	0.2865
edcomp*doscomp	8	28	1.40	0.2396

Variable: Zinc

Type III Tests of Fixed Effects				
Effect	Num DF	Den DF	F Value	Pr > F
blq	2	28	11.55	0.0002
edcomp	2	28	0.03	0.9681
doscomp	4	28	2.08	0.1097
edcomp*doscomp	8	28	1.19	0.3395

5. Variables del crecimiento de cultivo (3 meses).

Variable: Población

Type III Tests of Fixed Effects					
Effect	Num DF	Den DF	F Value	Pr > F	
blq	2	28	6.38	0.0052	
edcomp	2	28	0.50	0.6119	
doscomp	4	28	1.54	0.2189	
edcomp*doscomp	8	28	0.78	0.6224	

Variable: Altura

Type III Tests of Fixed Effects					
Effect	Num DF	Den DF	F Value	Pr > F	
blq	2	28	7.85	0.0020	
edcomp	2	28	0.78	0.4674	
doscomp	4	28	1.67	0.1847	
edcomp*doscomp	8	28	0.42	0.9015	

6. Variables del crecimiento de cultivo (6 meses).

Variable: Altura

Type III Tests of Fixed Effects					
Effect	Num DF	Den DF	F Value	Pr > F	
blq	2	28	7.59	0.0023	
edcomp	2	28	0.26	0.7719	
doscomp	4	28	2.66	0.0534	
edcomp*doscomp	8	28	0.65	0.7329	

Variable: Diámetro

Type III Tests of Fixed Effects					
Effect	Num DF	Den DF	F Value	Pr > F	
blq	2	28	1.25	0.3016	
edcomp	2	28	0.29	0.7532	
doscomp	4	28	2.27	0.0865	
edcomp*doscomp	8	28	0.32	0.9512	

5. Bibliografía

Abbeyes, H., Chadefaud, M., Felfmann, J., Ferré, Y., Gausсен, H., Grasse, P.P., Prevot, A.R. 1989. Botánica vegetales inferiores. Barcelona. España. Reverté. 50 p.

Agilar, F.J., González, P. 1998. Utilización agrícola del compost de RSU en cultivos leñosos de la provincia de Córdoba. Consejería de Agricultura y Pesca. Junta de Andalucía.

Amaya, A., Cock. J.H., Hernández, A, Irvine, J. 1995. Biología. En: Cenicaña. El cultivo de la caña en la zona azucarera de Colombia. Cali. Cenicaña. 31 – 62 p.

Amezquita, C.E. 1995. El agua y la erodabilidad de suelos. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. En: Fundamentos para la interpretación de análisis de suelos, plantas y agua de riego. Bogotá, Colombia. Guadalupe S.A. 128 -136 p.

Badiane, N.Y., Chotte, J.L., Pate, E., Masse, D., Rouland, C. 2001. Use of soil enzyme activities to monitor soil quality in natural and improved fallows in semi-arid tropical regions. *Applied Soil Ecology*. 18, 229-238 p.

Balkcom, K.S., Adams, J.F. Hartzog, D.L., Wood, C.W. 2001. Mineralization of composted municipal sludge under field condition. *Communications Soil Science Plant Analysis* 32(9-10): 1589 – 1605 p.

Barnhisel, R., Bertsch, P.M. 1982. Aluminium. pp 275 – 300. In: A.L. Page, R.H. Miller, and D.R. Keeney (eds.). *Methods for soil analysis*. Agronomy 9. Part 2. Soil Science Society of America. Madison, WI, USA.

Barreira, L., Philippi, A., Rodriguez, M. 2006. Usinas de compostagem do estado de Sao Paulo qualidade dos compostos e procesos de producao. *Eng. Sanit. Ambient.* 11 (4):385 – 393 p.

Basanta, R., García, M. A., Cervantes, J. E., Mata, H., Bustos, G. 2007. Sostenibilidad del reciclaje de residuos de la agroindustria azucarera: una revisión. *Ciencia y tecnología de alimentos*. 5(4): 293-305 p.

Blair, G.J., Blair, N., Lefroy, R.D.B., Conteh, A., Daniel, H. 1997. Relationships between $Kmno_4$ oxidizable C and soil aggregate stability and the derivation of a carbon management index. *In: Drozd J, Gonet SS, Senesi N, Weber J (Eds.) The role of humic substances in the ecosystems and environmental protection*. Polish Society of humic substances. Wroclaw, Poland. 227-232 p.

Bohórquez, A., Puentes, Y.J., Menjivar, J.C. 2014. Evaluación de la calidad del compost producido a partir de subproductos agroindustriales de caña de azúcar. *Manejo y conservación de suelos y aguas*. 15(1): 73 – 81 p.

Bohn, H.L., Mcneal, B.L., O'conor, G.A. 1993. *Química del Suelo*. Ciudad de México. México. Limusa S.A. 250 p.

Brady, N., Weil, R. 2004. *Elements of the nature and properties of soils*. New Jersey. Estados Unidos. 606 p.

Bray, R. H., Kurtz L.T. 1945. Determination of total, organic and available form of phosphorus in Soil. *Sci*. 59:360 – 361 p.

Bremner, J.M. y Tabatabai, M.A. 1972. Use of ammonia electrode for determination of ammonium in Kjeldahl analysis of soils. *Comm. In Soil Sci. And Plant. Anal.* 3 159-165.

Cabrera, J.A., Zuaznabar. 2010. Respuesta de la caña de azúcar a la fertilización nitrogenada en un experimento de larga duración con 24 cosechas acumuladas. *Cultivos tropicales*. 31(1):93 – 100 p.

Campitelli, Paola., Ceppi, Silvia. 2008. Chemical, physical and biological compost and vermicompost characterization: A chemometric study. *In: Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*. 90(1): 64–71 p.

Castaldi, P., Alberti, G., Merella, R., Melis, P. 2005. Study of the organic matter evolution during municipal solid waste composting aimed at identifying suitable parameters for the evaluation of compost maturity. *Waste Manag.*, 25: 209 – 213 p.

Castro, H.E., Gómez, M.I. 2010. Estándares generales para interpretar análisis de suelos con fines agrícolas. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. En: *Fertilidad de suelos y fertilizantes*. Bogotá, Colombia. Guadalupe S.A. 254 -255 p.

Christian, Archer., Evanylo, Gregory., Pease, James. 2009. *On farm composting: a guide to principles, planning and operations*. Blacksburg, Virginia: Virginia Cooperative Extension (VCE) 36 p.

Coûteaux, M.M., Bottner, P., Berg, B. 1995. Litter decomposition, climate and litter quality. *Trends in Ecology and Evolution* 10: 63 – 66 p. Coûteaux.

Cuellar I. 2002. *Manual de Fertilización de la Caña de Azúcar en Cuba*. Editorial PUBLINICA, la Habana.

Daza, M.C. 2014. Aplicación de compost de residuos de flores en suelos ácidos cultivados con maíz (*Zea mays*). *Revista ciencias técnica agropecuarias*. 23(3): 22 – 30 p.

Delgado, O.M., Menjivar, J.C., Muñoz, F. 2015. Influencia del sistema de manejo en la mineralización del nitrógeno y fertilización de caña de azúcar. *Revista facultad nacional de agronomía*. 69(1): 7755 – 7762 p.

Díaz, M.J., Jiménez, L., Cabrera, F., De Bertoldi, M. 2004. Using a second order polynomials model to determine the optimum vinasse/grape marc ratio for in vessel composting. *Compost Sci. Util.* 12 (3): 273 – 279 p.

Dual, R. 1965. *Dark Clay Soil of Tropical and Subtropical Regions*. Agric. Dev. Paper 83, FAO, Rome, Italy, 161 p.

Dual, R. Eswaran, H. 1988. Distribution, properties and classification of Vertisols. pp 1 – 22. In: L. Wilding and R. Puentes (eds.). *Vertisol: their distribution, properties,*

classification and management. Technical monograph 18. Texas A&M Printing Center. College Station, TX, USA.

Ekelund, L., Nyström, K. 2007. Composting of municipal waste in South Africa. Upsala Univ. 71 p. Disponible en:

http://www.sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/EKELUND%20and%20NYSTRÖM%202007%20Composting%20of%20Municipal%20Waste%20in%20South%20Africa.pdf.

Forsythe, W. 1975. Manual de laboratorio de Física de Suelos. Instituto Interamericano de cooperación para la Agricultura (IICA). Costa Rica. 212 p

Gaines, T.P., Mitchell, G.A. 1979. Boron determination in plant tissue by the azomethine H method. Comm. In Soil Sci. and Plant Anal. 10 1099 – 1108 p.

García, A. 2010. Manejo de la Degradación del Suelo. En: Burbano, H. y Silva, F. Ciencia del Suelo. Bogotá. Colombia. Guadalupe S.A. 309-356 p.

Galaviz, V. I., Landeros, S. C., Castañeda, C. M., Martínez, D. J., Pérez, V. A., Nikolskii, G. I. and Lango, R. F. 2010. Agricultural contamination of subterranean water with nitrates and nitrites: an environmental and public health problem. J. Agric. Sci. 2(2):17-30 p.

Gómez, J. 2000. Abonos Orgánicos. Cali. Colombia. Feriva S.A. 50 – 63 p.

Gómez, M., Castro, H. 2009. Gestión de la fertilidad de suelos: diagnóstico, interpretación, y recomendación de nutrientes en la fertilización de cultivos. Diplomado de fertilidad de suelos y fertilizantes. Ingeplant. Bogotá. 61p.

Gómez, A., Cruz, R., Torres, J.S., Londoño, J.D., Campos, A. 2007. Macroproyecto de agricultura específica por sitio. Afinamiento y validación de los grupos de humedad. Colciencias – Cenicaña. Cali. Colombia. 120 p.

Guerra, E., Vázquez, M., Díaz, M. 2003. Dynamics of the co-composting of barley waste with liquid poultry manure. Journal of the Science of Food and Agriculture 83:166-172 p.

Hallsworth, E.G., Beckmann, G.G. 1969. Soil Sci. 107 p.

He, Z., Yang, X., Kahn, B.A., Stofella, B.J., Calvert, D.V. 2004. Ventajas que suponen la utilización de compost para la nutrición fosfórica, potásica, cálcica, magnésica y de micronutrientes. En: Stofella, B.J. Kahn, B.A., Utilización de compost en los sistemas de cultivo hortícolas. Mundi-Prenda. Madrid.

Heal, O.W., Anderson, J.M., Swift, M.J. 1997. Plant litter quality and decomposition: an historical overview. In *Driven by nature: plant litter quality and decomposition* (Cadisch G & Giller KE, Eds.). Wallingford, Oxon: CAB Internacional, 3 – 30 p.

HUNTER, A. H., Laboratory Analysis of Plant tissue samples. International Soil Fertility Evaluation and Improvement, Raleigh, N. C., E.U. 1974. 5 p.

Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 1980. Estudio semidetallado de suelos del valle geográfico del río Cauca. Bogotá. Colombia. 582 p.

Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 1990. Métodos analíticos de laboratorio de suelos. Bogotá. Colombia. 582 p.

Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Corpoica, 2002. Cobertura y uso actual de las tierras en Colombia. Bogotá. Colombia. 30, 76, 78 p.

Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Cenicaña, 2003. Estudio detallado de suelos y capacidad de uso de las tierras sembradas con caña de azúcar en el Valle Geográfico del Río Cauca. Cali. Colombia. 15 – 79 p.

Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Cenicaña. 2006. Estudio detallado de suelos y capacidad de uso de las tierras sembradas con caña de azúcar en el Valle geográfico del río Cauca. Informe general. Cali. Colombia. 37 p.

Instituto Geográfico Agustín Codazzi. 2006. Métodos analíticos de laboratorio de suelos. IGAC. Bogotá. Colombia.

Isaac, R.A., Kerber, J.D. 1971. Capítulo 2 en *Instrumental Methods for Analysis of Soil and Plant Tissue*. L.M. Waish (ed).

IUCN, UNEP, WWF. 1980. World Conservation Strategy: living resource conservation for sustainable development. Gland: International Union for Conservation of Nature and Natural Resources.

IUSS Working Group WRB. IUSS-ISRIC and FAO (International Union of Soil Sciences-Information Soil Reference and Information Centre a Food and Agriculture Organization). 2006. World reference base for soil resources. A framework for international classification, correlation and communication 2nd ed. World Soil Resources Report 103. FAO. Rome, Italy.

Jastrow, J. Miller, R. 1998. Soil aggregate stabilization and carbon sequestration: feedbacks through organo – mineral associations. En: Soil processes and the carbon cycle. Ed. By Lai R, Kimble J, Follett R, Stewart B. II. Series: Advances in Soil Science. Boca Raton, FL. 33431. 245: 266.

Kalil, S.P. 2007. Seguimiento del proceso de humificación en compost inoculado. (Tesis de pregrado). Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá. Cundinamarca.

Khan, I. A., Seema, N., Raza, S., Yasmine, S., Bibi, S. 2013. Environmental interactions of sugarcane genotypes and yield stability analysis of sugarcane. Pakistan. *Pak. J. Bot.* 45(5):1617 – 1622 p.

Labrador, J. 2002. La materia orgánica en los agroecosistemas. Madrid. España. Mundi-prensa. 89, 90, 91, 92, 152, 168, 180 p.

Laird, D.A., Martens, D.A., Kingery, W.L. 2001. Nature of Clay-Humic Complexes in an Agricultural Soil. I.Chemical, Biochemical, and Spectroscopic Analyses. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65: 1413-1418 p.

Li, C. C. 1977. *Path Analysis*. Pacific Grove, CA, USA. 346 p.

Lindsay, W.L., Norverl, W.A., *Soil Sci. Soc. Am. J.* 1978, 42, 421 – 428 p.

Macedo, J.R., Souza, M.D., Reichardt, K., Bacchi, O.S. 2006. Atributos físicos e hídricos em solo tratado com lodo de esgoto. In: BETTIOL, W. & CAMARGO, O.A. Lodo de

esgoto-impacto ambiental do uso agrícola. Jaguariúna, Embrapa Meio Ambiente. 193 - 205 p.

Madejón, E., López R., Murillo J. M., Cabrera F. 2001. Agricultural use of three (sugar-beet) vinasse composts: effect on crops and chemical properties of a Cambisol soil in the Guadalquivir river valley (SW Spain). *Agriculture, Ecosystems and Environment* 84:55–65 p.

Malagón, D., Montenegro, H. 1990. Propiedades físicas de suelos. Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Bogotá. Colombia.

Marmolejo, L. 2011. Marco conceptual para la sostenibilidad de los sistemas de aprovechamiento de residuos sólidos en cabeceras municipales menores a 20,000 habitantes del Valle del Cauca. Tesis Doctorado. Doctorado en Ingeniería, énfasis Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Cali (Colombia). Universidad del Valle. Facultad de Ingeniería.

Matichenkov, V.V., Ammosova, Y.M. Bocharnikova, E.A. 2001. Influence of silicon fertilizer on plants and soil // *Agrokimiya(Agrochemistry)* [in Russian] 12: 30 – 38 p.

McKean S. 1993. Manual de Análisis de Suelos y Tejido Vegetal. CIAT

Michel, F.C., Pecchia, J.A., Rigot, J. 2004. Mass and nutrient losses during the composting of dairy manure amended with sawdust or straw. *Compost Sci. Util.*, 12(4):323 – 334 p.

Misra, R.V., Roy, R. N., Hiraoka, H. 2003. On-Farm Composting Methods. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Recuperado el día 7 de febrero de 2016 de la World Wide Web: <http://www.fao.org/docrep/007/y5104e/y5104e00.HTM>

Mora, G., Ordaz, C.H.V., Castellanos, J.Z., Aguilar, S.A., Gavi, F., Volke, H.V. 2001. Sistemas de labranza en algunas propiedades físicas en un vertisol, después de cuatro años de manejo. *Terra* 19: 67-74.

Moreno, J., Moral, R. 2008. Compostaje. Madrid. España. Mundi-Prensa. 134 - 136.

Munévar, F. 2010. Transformaciones microbianas del fósforo. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. En: Organismos del suelo. Bogotá, Colombia. Guadalupe S.A. 460 - 463 p.

Muñoz, F., Villegas, A., Moreno C.A. 2012. El compost de residuos agroindustriales de la caña de azúcar. Componente clave para la sostenibilidad y mejoramiento de la calidad del suelo. En VII Congreso de la Asociación de Técnicos Azucareros de Latinoamérica y del Caribe; IX Congreso de la Asociación Colombiana de Técnicos de la Caña de Azúcar. Memorias. Septiembre 12 al 14. Cali, Colombia. Tomo 1. 436 – 445 p.

Muñoz, V.J., Tovar S.J.L., Ortiz, S.C.A., Castellanos, R.J.Z. 1990. El uso de estiércol como mejorador de algunas propiedades de suelos arcillosos de la comarca lagunera. *Agrociencia* 1: 127- 144

Murphy, J. Riley, J.P. 1962. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Anal-Chim. Acta.* 27: 31 -36 p.

Navarro, S., Navarro G. 2013. Química Agrícola. Madrid. España. Mundi-prensa. 128, 236, 260, 316 p.

Olego, M.A., Cordero, J., Quiroga, M.J., Sánchez, M., Álvarez, J.C., Garzón, E. 2015. Efecto de la aplicación de leonardita en el nivel de materia orgánica y micronutrientes en un suelo inceptisol dedicado a viña (*Vitis vinífera L.*). *ITEA.* 111(3): 210 – 226 p.

Osorno, H. 2012. Mitos y realidades de las cales y enmiendas en Colombia. (Tesis de Maestría). Universidad Nacional de Colombia. Medellín. Antioquia.

Oviedo, R., Marmolejo, L., Torres, P. 2012. Perspectivas de aplicación del compostaje de biorresiduos provenientes de residuos sólidos municipales. Un enfoque desde lo global a lo local. *Revista de ingenierías Universidad de Medellín.* 11(20): 67 – 76 p.

Pagano, E. D., Peternellil, L. A., Mendes de Paulall, T. O., Pereira B. M. 2012. Análise de trilha usando valores fenotípicos e genotípicos para componentes do rendimento na seleção de famílias de cana-de-açúcar. *Ciência Rural* 42(1):38 – 44 p.

Paneque, V. M., Martínez, A. 1992. La cachaza como sustituto de los fertilizantes químicos para la caña de azúcar cultivada en suelo Ferralítico Amarillento. *Cultivos Tropicales*, 13(2-3):14-16 p.

Quintero, R. 1995. Fertilización y nutrición. En: *Cenicaña. El cultivo de la caña en la zona azucarera de Colombia*. Cali. Cenicaña. 156 p.

Quintero, R. 2008. Efectos de la aplicación de elementos menores en caña de azúcar en suelo del Valle del Rio Cauca. *Revista Tecnicaña*. 12(20):18 -26 p.

Quiroz IG, Pérez AV. 2013. Vinaza y compost de cachaza: efecto en la calidad del suelo cultivado con caña de azúcar. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 5:1069-1075.

Revista ambienta. "El suelo lanza un SOS". 2002. Recuperado el día 15 de marzo de 2016 de la World Wide Web: <http://dialnet.unirioja.es> .

Ribó, M. 2004. Departamento de recursos naturales. Balance de macronutrientes y materia orgánica en suelos de agroecosistemas hortícolas con manejo integrado ecológico. *Universitat de valencia*. 185 p.

Richards, L.A. Weaver, L.R. 1944. Moisture retention by some irrigated soils as related to soil as related to soil moisture tension. *Journal of Agricultural Research* 69: 215 – 235 p.

Richards, L.A. 1948. Porous plate apparatus for measuring moisture retention and transmission by soil. *Soil Science* 66 (2):105 – 110 p.

Riches, D., Porter, I.J., Oliver, D.P., Bramley, B., Edwards, J., White, RE. 2013. Review: soil biological properties as indicators of soil quality in Australian viticulture. *Australian Journal of Grape and Wine Research* 19:311-323 doi: 10.1111/ajgw.12034.

Rhoades, J.D. 1982. Cation exchange capacity. In: A.L. Page (ed) *Methods of soil analysis. Part:2 Chemical and microbiological properties* (2nd ed.) *Agronomy* 9: 149 – 157 p.

Robertson, F.A., Morgan, W.C. 1995. Mineralization of C and N in organic materials as affected by duration of composting. *Australian Journal of Soil Research* 33(3):511 – 524 p.

Rojas, L.C., Piñeros, Y., Velásquez, M.E. 2011. Producción de azúcares fermentables a partir de fibra de palma de aceite pretratada biológicamente por *Pleurotus ostreatus* y *Phanerochaete chrysosporium*. *Revista ion*. 24(2):29-35 p.

Roy, B.B., Barde, N.K. 1962. *Soil Sci*. 93, 142 p.

Ruiz, F.J.F. 1996. Los fertilizantes y la fertilización orgánica bajo la óptica de un sistema de producción orgánico. En Zapata ARJ, Calderón AR (Eds.) *Memoria del primer foro nacional sobre agricultura orgánica*. UAM/CONARAO/INIFAP. Colima, México. 23-47 p.

Ruíz, N. R., Medina, N. 1983. Efecto de la cachaza sobre algunas propiedades del complejo de absorción y la reacción de un suelo Ferralítico Amarillento Concrecionado. *Cultivos Tropicales*, 5(2).

Salamanca, S. 2012. Compostaje de residuos industriales en Colombia. *Revista Técnicaña*. 28:13-18 p.

Salazar, S. E., Trejo, E. H. I., Vásquez, V. C., López, M. J. D., Fortis, H. M., Zuñiga, T. R., Amado, Á. J. P. 2009. Distribución de nitrógeno disponible en suelo abonado con estiércol bovino en maíz forrajero. *Terra Latinoamericana* 27: 373-382 p.

Salgado-García S. D. J., Palma-López, J., Lagunes-Espinoza y M. Castelán-Estrada. 2006. *Manual para el muestreo de suelos, plantas, y aguas e interpretación de análisis*. 2(ed.) Colegio de Postgraduados. Campus Tabasco-ISPROTAB. H. Cárdenas, Tabasco. México. 90 p.

Sánchez, R., Ordaz, V., Benedicto, G., Hidalgo, C., Palma, D. 2005. Cambios en las propiedades físicas de un suelo arcilloso por aportes de lombricompost de cachaza y estiércol. *Interciencia*, 30 (12):775-779 p

Sequi, P. Bertoldi, M., Lemnes, B., Papi, T. 1996. The role of composting in sustainable agriculture. En: *The Science of composting*. Springer Netherland. 23 -29 p.

Singh, S. 1954. *J. Soil Sci*. 5, 289 p.

Soil Survey Staff. 2003. Keys to Soil Taxonomy. 9th ed. Us Department of Agriculture – Natural Resources Conservation Service. Washington, DC. USA.

Solano, G., Castillo, P., Ortiz, C., Rosalba, A. 2012. Efecto del compost elaborado con residuales azucareros sobre algunas propiedades agroquímicas de un suelo vertisol. Granma Ciencia. 16 (1):1 - 7 p.

Subirós, F. 1995. El cultivo de la caña de azúcar. San José. Costa Rica. Universidad Estatal a Distancia. 151 - 157 p.

Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios. “Diagnóstico sectorial. Plantas de aprovechamiento de residuos sólidos”. 2011. Recuperado el día 25 de enero de 2016 de la World Wide Web: <http://www.superservicios.gov.co/c/document>

Suzuki, Takeshi., Ikumi, Yoshio., Okamoto, Syo-taro., Katanebe, Ikuo., Fujikate, Nobujide., and Otsuka, Hiroo. 2004. Aerobic composting of chips from clear-cut trees with various co-materials. Bioresource Technology. 95:121–128 p.

Tahboub, M. B., Lindemann W. C., Murray, L. 2008. Chemical and physical properties of soils amended whit pecan wood chips. HortScience 43: 891-896 p.

Tenorio, Z. O., Silveira, C. O. R., Ribeiro- F. S., Gascó, M. y Guerrero, L. F. 2000. Estudio de la actividad biológica de dos suelos de los tableros costeros del NE de Brasil enmendados con residuos agrícolas: vinaza y torta de caña de azúcar 4:70-74 p.

Tejada, M., Gonzalez, J. 2006. Effects of two beet vinasse forms on soil physical properties and soil loss. Catena. 68:4-50 p.

Tenorio, Z. O., Silveira, C. O. R., Ribeiro- F. S., Gascó, M., Guerrero, L. F. 2000. Estudio de la actividad biológica de dos suelos de los tableros costeros del NE de Brasil enmendados con residuos agrícolas: vinaza y torta de caña de azúcar. 4:70-74 p.

Thippeswamy, S; Kajjidoni, S. T.; Salimath, P. M.; y Goud. J. V. 2003. Correlation and path analysis for cane yield, juice quality and their component traits in sugarcane. Sugar Tech. 5(1 - 2):65 – 72 p.

Tomati, U., Madejon, E., Galli, E. 2000. Evolution of humic acid molecular weight as an index of compost stability. *Compost Sci. Util.*, 8(2): 108 – 115 p.

Unigarro, A.C., Victoria, J.I., Checa, O.E. 2013. Evaluación del área de aerénquima radical en caña de azúcar (*saccharum spp.*) como característica de tolerancia a hipoxia. *Acta Agronómica*. 62 (3), 223-231 p.

Valenzuela, I.C., Torrente, A. 2010. Manejo de la Degradación del Suelo. En: Burbano, H. y Silva, F. *Ciencia del Suelo*. Bogotá. Colombia. Guadalupe S.A. 163 p.

Villegas, A. 2007 .Producción alcohol carburante. En: *Boletín Informativo Entérese*. Incauca S.A. 2 – 3 p.

Viveros, C.A., Baena, D., Salazar, F., López, L.O., Victoria, J.I. 2015. Características de la caña de azúcar asociadas con toneladas de caña por hectárea y sacarosa (% caña). *Acta Agronómica*. 64 (3) 268-272 p.

Villanueva, R. E. P.; Sánchez, G. N.; Rodríguez, M. E.; Villanueva, N. E.; Ortiz, M. y Gutiérrez, E. J. A. 1998. Efecto de reguladores del crecimiento y tipo de sustrato en el enraizamiento de kalanchoe. *Terra Latinoamericana* 16:33-41.

Walkley, A., Black, I.A. 1934. An examination of Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Sci.* 37: 29 – 37 p.

Ward M. 2002. *Composting a beginner's guide*. Slippery rock, Pennsylvania: Slippery University. 26 p.

Whalen, J.K., Hu, Q., Liu, A. 2003. Compost applications increase water-stable aggregates in conventional and no-tillage systems. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 67: 1842-1847.

Williams, C.H., Colwell, J.D. 1977. In *Soil factors in crop production in a semi-arid environment* (eds. J.S. Russell and EX. Greacen), Univ. of Queensland Press, St Lucia, Qd., Australia , 105 – 126 p.

Yoder, R.E., 1936. A direct method of aggregate analysis of soil and a texture of the physical nature of erosion losses. *J. Amer. Soc. Agron.*, 28: 337 – 351 p.

Zurbrugg, C.; Drescher, S., Rytz, I., Maqsood, S., Enayetullah, I. 2005. Decentralised composting in Bangladesh a win – win situation for all stakeholders. *Resour. Conserv. Recy.* 43 (3):281 – 292 p.