



UNIVERSIDAD DE CIEGO DE AVILA

FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS BIOLÓGICAS

Modificaciones inducidas por la vinaza en las propiedades físicas y químicas de Vertisoles dedicados al cultivo de la caña de azúcar en la zona norte de Ciego de Ávila.

Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Agrícolas

Autor: Ing. Jorge Enrique Armengol Díaz

Tutor: Dr. Rafael Lorenzo Ortiz

Ciego de Ávila

2002

AGRADECIMIENTOS

Son muchos los compañeros que de una forma u otra contribuyen a la culminación de un trabajo como este, pero especialmente quisiera dejar constancia de ello en un pequeño pero sincero gesto de gratitud.

A mi tutor Dr. Rafael Lorenzo Ortiz por su constancia, dedicación, perseverancia, paciencia y apoyo incondicional en todo momento.

A mi colega Dra. Rosa Orellana Gallego por revisar versiones del documento, así como por las ideas, sugerencias aportadas y sabios consejos.

A los Doctores Nelson Arzola Pina y Victor Manuel Paneque a quienes considero los padres de los residuales en Cuba como oponentes en la predefensa de la tesis, por las sugerencias e ideas aportadas y por haberme dedicado tiempo entre sus múltiples obligaciones.

Al Dr. Pedro Cairo Cairo quien recibió una de las primeras versiones del documento y me ofreció amablemente su apoyo.

A los Doctores Santiago Cabrera, Ricardo Rodríguez, Oscar Brown, Manuel Peña y Nicolás Quintana, quienes son mis compañeros y me apoyaron incondicionalmente.

Al Dr. Ramiro Castillo León Decano y amigo de estudios por su apoyo, así como a los compañeros de la Vicerectoría de Investigaciones por su preocupación, principalmente la Dra. Nancy García y la MSc. Norma Medina.

A mis compañeros más cercanos Ingenieras Noemí, Margelis y Diana por haber asumido la docencia que me correspondía sin vacilación en un gesto de verdadero compañerismo.

A mis compañeros del núcleo PCC 369 por su apoyo.

A mis compañeros del Departamento quienes han estado al tanto en todo momento principalmente los MSc Lazaro y Alexis.

A los compañeros Ingenieros, Erduyn, Yusimi, Noel y Ania a quienes moleste frecuentemente.

Y en esta etapa final no podría dejar de mencionar a quien me ha apoyado incesantemente y le estoy profundamente agradecido: Ing. José Luis Companioni.

MUCHAS GRACIAS A

TODOS

DEDICATORIA.

Este sencillo pero significativo documento lo dedico especialmente a la memoria de quien fuera mi padre y a la vez abuelo Lula, quien me alentó y acompañó durante estos años en el montaje y conducción de los experimentos y me brindo todo su apoyo.

A mi madre Norma, mi abuela Nena y Alejandro, a todos por su gran amor y apoyo.

A mi esposa Olgui por haberme tenido que soportar en estos difíciles momentos.

A mi chiquitica Yeily, la cual me cautiva especialmente y adoro por su hermoso carácter e inteligencia de manera que en un futuro este trabajo le sea un pequeño estímulo en el desempeño de sus estudios y para que sus actividades las realice con esmero, lo que permitirá triunfar en la vida.

SÍNTESIS.

La presente investigación se desarrolló en áreas de producción del Complejo Agroindustrial "Enrique Varona González", en la provincia de Ciego de Ávila con el fin de evaluar el efecto de diferentes formas de manejo del residuo de destilería (vinaza) sobre las propiedades físicas y químicas de Vertisoles en los diferentes niveles jerárquicos de organización estructural del suelo, bajo el cultivo intensivo de la caña de azúcar. Para ello, se establecieron experimentos de campo en los cuales se aplicó vinaza pura en diferentes variantes, sólo en el momento de la plantación en la concepción de enmienda orgánica con dosis de (0, 50, 100, 150, 200 y 250 m³. ha⁻¹). Otro tratamiento recibió fertilización mineral NPK. También, vinaza en dilución como agua para riego en la relación; vinaza/agua (1/2.5, 1/5, 1/10 y 1/20), variando de una dilución a otra la dosis de vinaza pura de 240, 120, 60 y 30 m³.ha⁻¹ respectivamente.

Se evaluó el efecto acumulativo durante dos años para las diluciones y el efecto residual hasta la quinta cosecha en ambas alternativas de manejo. Se realizó, además un pesquisaje de campo a bloques cañeros regados con mezcla de residuos de crudo y destilería por más de quince años.

Los resultados muestran importantes cambios en el estado nutricional de estos suelos, sobre todo en los incrementos de los contenidos de materia orgánica, fósforo y potasio asimilable para las dosis de vinaza pura aplicadas.

Similares resultados mostraron las diluciones, destacándose en este sentido la dilución vinaza-agua 1/5 (120 m³.ha⁻¹). Estas formas de manejo de la vinaza repercutieron positivamente en el mejoramiento del estado físico de dichos suelos, con importantes modificaciones en su estado estructural, en el grado de estabilidad de la microestructura, el porcentaje de agregados agrónomicamente más valiosos y su estabilidad al agua, así como en las propiedades estructuro funcionales, hidrofísicas y porosas evaluadas. Las aplicaciones de este residuo permitió prescindir de la fertilización mineral por un periodo de hasta cinco años, con un marcado efecto residual.

Emplear la vinaza mezclada con el residuo de producción de azúcar crudo, es una alternativa factible a utilizar, por la estabilidad que en las propiedades físicas y químicas de los Vertisoles produce.

Se obtuvieron rendimientos agrícolas altos y efecto económico favorable en todas las variantes que recibieron los residuos. Las dosis de $150 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ de vinaza pura y la dilución 1/5 ($120 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$) mostraron el mejor comportamiento.

INDICE

Pag.		
1.	INTRODUCCIÓN.	1
2.	REVISION BIBLIOGRAFICA.	4
2.1.	El papel de los Vertisoles en la producción agrícola en el mundo y Cuba. Propiedades generales que los caracterizan y definen su manejo.	4
2.2.	Manejo Tecnológico y Agronómico de los suelos. El caso específico de los Vertisoles y sus propiedades físicas.	8
2.3.	Enfoque agrofísico de carácter energético en la evaluación del mejoramiento de suelos. Diagrama del estado físico del suelo.	13
2.4.	Actualidad y perspectivas sobre la utilización de los residuos orgánicos de carácter industrial en el mejoramiento y manejo de suelos.	16
2.5.	Utilización agrícola del residuo de destilería. (vinaza)	20
3.	MATERIALES Y METODOS.	27
3.1	Ubicación y características agroecológicas de la zona donde se desarrollaron los experimentos. Descripción morfogenética y clasificación de los suelos.	26
3.2	Consideraciones generales acerca del montaje y conducción de los experimentos.	28
3.3.	Características de los experimentos de campo.	29
3.3.1	Utilización del residuo de destilería (vinaza pura) como enmienda orgánica	29
3.3.2	Utilización de la vinaza en dilución como agua para riego	31
3.3.3	Extensión de producción. Riego tradicional con mezcla de residuos de destilería y crudo por más de quince años.	32

3.4	Métodos	34
3.4.1	Determinaciones químicas realizadas a las aguas residuales.	34
3.4.2	Determinaciones químicas, físicas y físico químicas realizadas a los suelos.	35
3.4.3		39
	<i>Evaluaciones realizadas a la planta</i>	
3.5	Métodos estadísticos empleados.	40
3.6	Evaluación económica de los resultados.	40
4.		42
	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.	
4.1	Caracterización química del residuo de producción de alcohol (vinaza) procedente de la destilería " Nauyu " y de su mezcla con el residuo de producción de azúcar crudo del CAI " Enrique Varona ". Calidad agronómica de estas aguas.	42
4.2	Influencia del residuo de destilería en las variantes puro (como enmienda orgánica), y diluido (como agua para riego) sobre las propiedades del suelo en el nivel jerárquico de estructuración iónico molecular.	45
4.2.1	Equilibrio ácido base. Comportamiento del pH en agua y en cloruro de potasio. Materia Orgánica.	45
4.2.2	Fósforo asimilable.	46
4.2.3	Potasio asimilable. Potasio intercambiable.	48
4.2.4	Cationes Cambiables.	50
4.2.5	Comportamiento de las relaciones intercatiónicas estudiadas. Relación calcio-magnesio (Ca^{++}/Mg^{++}), potasio-calcio (K^{+}/Ca^{++}) y potasio-magnesio (K^{+}/Mg^{++}).	51
4.2.6	Capacidad de Cambio de Bases (Valor S) y Capacidad de Cambio Catiónico (Valor T).	
4.2.7	Modificaciones del residuo de destilería en las propiedades de los Vertisoles a nivel de partículas elementales.	53
	Composición granulométrica y de microagregados.	
	Modificaciones del residuo de destilería sobre las propiedades del suelo a nivel	54

4.3	de agregados. Composición de macroagregados y estabilidad estructural.	
	<i>Modificaciones relacionadas con los índices físicos de la fase sólida</i>	55
4.3.1	<i>y las propiedades estructuro-funcionales.</i>	55
4.3.2	Tratamiento energético de las propiedades físicas. Diagrama del estado físico del suelo.	
	<i>Modificaciones inducidas por el residuo de destilería puro y en</i>	58
4.3.3	<i>dilución en las magnitudes relacionadas con el movimiento del agua</i>	
	<i>en el suelo.</i>	61
4.4	Efectos de la vinaza pura y diluida en los rendimientos del cultivo de la caña de azúcar.	66
4.4.1	Modificaciones producidas en las propiedades químicas y físicas de los Vertisoles tratados por más de quince años con la mezcla de vinaza y el residuo de producción de azúcar crudo. (Experimento N° 3)	
	Evaluación económica de los sistemas de manejo de la vinaza.	70
4.5	CONCLUSIONES.	
	RECOMENDACIONES.	
	BIBLIOGRAFÍA.	72
4.6	ANEXOS	
		76
4.7		80
5.		83
6.		86
7.		87

1. INTRODUCCIÓN.

Para lograr satisfacer las necesidades alimentarias de la población a escala mundial es imprescindible dirigir la agricultura hacia un desarrollo sostenible, el que debe en primer lugar mantener la capacidad de los suelos para producir alimentos e incrementar su productividad en un futuro cercano (IFA, 1999).

Independientemente de esta aseveración de extraordinaria importancia, la degradación de los suelos que se ha venido produciendo en el mundo, y dentro de la cual no se excluyen los suelos cubanos, así como las afectaciones que produce en los rendimientos de los cultivos, se presenta como un grave problema a resolver, y se encuentra entre las principales causas de la insostenibilidad de los sistemas de producción agropecuarios.

Teniendo en cuenta esta problemática, es que las acciones estratégicas de los Ministerios de Ciencia, Tecnología y Medio ambiente, del la Agricultura y del Azúcar, están encaminadas a la búsqueda de alternativas económicas referentes al mejoramiento de suelos (MINAG, 1999).

Dentro de los suelos agrícolas cubanos un papel importante en la producción de caña de azúcar la desempeñan los Vertisoles (aproximadamente el 30 %); sin embargo, a ellos están asociadas propiedades que dificultan su manejo e impiden la obtención de rendimientos altos y estables, por ello se requiere un estudio detallado de sus características en las diferentes regiones del país. (Cairo, 1988)

Si tenemos en cuenta estas propiedades, que también se verifican en los que se ubican en la zona norte de la provincia Ciego de Ávila, se hace necesario la búsqueda de alternativas tecnológicas y métodos especiales para su mejoramiento, dentro de las cuales el uso de residuos de la industria azucarera y derivados constituyen una vía efectiva y económica para

modificar sus propiedades, lo que implica incrementar su uso hasta convertir esta actividad realmente en sistemática y rutinaria, y contribuir así al cumplimiento de las acciones de la Estrategia Ambiental Nacional (1999) en lo referente a la protección del recurso suelo y agua con el aprovechamiento de los residuos de destilería.

Un problema a resolver por el CAI " Enrique Varona González" en Ciego de Ávila, donde la caña de azúcar está plantada en más de un 70% sobre Vertisoles es atenuar los factores que limitan su capacidad productiva y minimizar los impactos ambientales que provocan sus residuos, al ser la destilería de alcohol "Nauyú" responsable de la generación de volúmenes superiores a 3 millones 300 000 m³ durante todo el año, de los que se utilizan menos de un 5 % en la actualidad en la agricultura cañera del mencionado complejo.

Con relación a esta temática, se han obtenido algunos resultados en Cuba y en el extranjero que indican modificaciones en las propiedades físicas y químicas de los suelos cuando fueron utilizados diferentes residuos industriales azucareros (fundamentalmente residuo de producción de levadura torula y de producción de azúcar crudo), reportándose además; efectos favorables sobre los rendimientos de la caña de azúcar como han referido (Arzola et al., 1985; Paneque et al., 1989; Martínez et al., 1996; Lorenzo 1998; Rodríguez 1998; Gómez 2000). Sin embargo, sobre el empleo del residuo de destilerías de alcohol (vinaza) en diferentes alternativas de manejo: Puro (como enmienda orgánica), diluido (como agua para riego) y mezclado (con el residuo de producción de azúcar crudo), como fuente de agua, materia orgánica disuelta y nutrientes y su influencia sobre las propiedades físicas y químicas de Vertisoles a corto, mediano y largo plazo existen pocas evidencias en el país y en el mundo cañero sobre su empleo. A pesar de que la práctica de utilizar vinaza para algunos países productores de caña de azúcar como Brasil es obligatoria para fertilizar dicho cultivo, evitar contaminación ambiental y lograr el mejoramiento de suelos con problemas de degradación como refieren (Alfaro, 2000; Rodríguez y Chávez, 2000).

Teniendo en cuenta lo planteado con anterioridad se asume la hipótesis y objetivos siguientes:

La vinaza de acuerdo con su composición química y contenido de materia orgánica empleada en diferentes alternativas de manejo, induce modificaciones en las propiedades físicas y químicas de los Vertisoles, eleva su productividad e incrementa los rendimientos del cultivo de la caña de azúcar.

1. Evaluar las modificaciones producidas por la vinaza pura en la concepción de enmienda orgánica sobre las propiedades físicas y químicas de los Vertisoles, teniendo en cuenta su efecto residual en el suelo y en los rendimientos del cultivo de la caña de azúcar.
2. Evaluar las modificaciones que en las propiedades físicas y químicas de Vertisoles induce la vinaza diluida en agua clara, tanto en el efecto acumulativo como residual en el suelo y en los rendimientos del cultivo de la caña de azúcar.
3. Evaluar en condiciones de producción las modificaciones provocadas por las aplicaciones continuadas de la mezcla de vinaza y el residuo de producción de azúcar crudo en las propiedades físicas y químicas de Vertisoles y su influencia en el rendimiento del cultivo de la caña de azúcar.
4. Aplicar el enfoque agrofísico de carácter energético para la evaluación de las modificaciones inducidas por la vinaza en los Vertisoles.

NOVEDAD CIENTÍFICA.

La utilización de los residuales de la industria azucarera en el fertiriego de la caña de azúcar es una temática que ha sido abordada por investigadores nacionales e internacionales como indican: Paneque et al., (1987); Arzola, (1988,1996); Bach et al., (1990); Lorenzo, (1992); Martínez et al., (1996); Cabrera et al., (1999); Alfaro, (2000); Rodríguez et al., (2000).

En el país se desarrollo durante el quinquenio 1986-1990 un Programa Científico Técnico (PCT 008) en el que se obtuvo un conjunto de resultados al respecto; sin embargo, lo referido al manejo del residuo de destilería se presentó de manera preliminar, existiendo pocos antecedentes acerca de la utilización de la vinaza en diferentes alternativas de manejo; así como sobre las modificaciones que en las propiedades físicas, químicas y físico-químicas de los Vertisoles induce a corto, mediano y largo plazo. Es a su vez poco conocido sobre su efecto acumulativo y residual en el suelo y los rendimientos del cultivo de la caña de azúcar.

El empleo de la vinaza pura en la concepción de enmienda orgánica es un criterio nuevo.

Los resultados que se presentan con relación al uso de estos residuos en otras formas de manejo, como es el caso de emplearlo diluido en agua para riego o la variante de mezclar la vinaza con el efluente de producción de azúcar crudo provocan importantes cambios en las propiedades de estos suelos, lo que contribuye a contrarrestar factores limitantes como el drenaje, la aireación y la compactación a que dichos suelos están sujetos, a la vez que se logra prescindir de la fertilización mineral, evitar contaminación ambiental e incrementar sustancialmente los rendimientos del cultivo.

2. REVISION BIBLIOGRAFICA.

2.1. El papel de los Vertisoles en la producción agrícola en el mundo y Cuba.

Propiedades generales que los caracterizan y definen su manejo.

Los suelos arcillosos sujetos a cambios de volumen al humedecerse y secarse cubren alrededor de 260 millones de hectáreas en el mundo (Comerma, 1998). La mayoría se agrupan bajo el nombre de Vertisoles, tanto en la Soil Taxonomy como en el sistema oficial francés y en la leyenda del mapa mundial de suelos de la FAO. Estos suelos, especialmente en regiones tropicales y subtropicales, representan recursos edáficos actuales y potenciales de gran valor, fundamentalmente debido a sus buenas condiciones de fertilidad natural y a su alta capacidad de retención de agua, a la vez que constituyen un alto porcentaje de suelos agrícolas distribuidos bajo una amplia variedad de condiciones climáticas, vegetación, altura sobre el nivel del mar y relieve. En ellos se presentan diversos problemas de manejo, debido a su alto contenido de arcillas expandibles, lo que provoca condiciones de hidromorfía en el perfil (Ruiz et al., 1995; Gutiérrez et al., 1995).

La World Reference Base of Soil Resources (2000), al caracterizar los Vertisoles señala que presentan un horizonte vértico dentro de los 100 cm desde la superficie, 30% o más de arcilla en todos los horizontes hasta una profundidad de un metro, contacto lítico o paralítico, además de grietas que se abren y cierran periódicamente.

Al referirse a los Vertisoles, Ruiz y Cerda (1995), plantean que son suelos difíciles de manejar para la producción de cultivos debido a su fina textura (> de 35 % de arcilla), pobre estructura

y drenaje interno deficiente, así como por el agrietamiento en el horizonte superficial y la formación de costras. Su uso está orientado fundamentalmente a cultivos como la caña de azúcar, arroz u otros cuyo sistema radical resista los fenómenos de contracción dilatación producidos por el alto contenido de arcillas que presentan. El contenido de materia orgánica es moderado, la permeabilidad lenta, y el color de negro a gris oscuro. En sus propiedades morfológicas se presentan caras de deslizamiento, micro relieve gilgai, grietas en la superficie del suelo de 1 cm de ancho o más y 50 cm de profundidad.

En Cuba los suelos vérticos ocupan 1.5 millones de hectáreas, encontrándose la mayor parte en la región oriental del país, representan el 13.6% del territorio nacional y el 17% del área cultivable, cerca de 2.8 millones de hectáreas se encuentran dañadas por el mal drenaje (37% del área agrícola), y sobre ellos se desarrollan diferentes cultivos de interés económico según Fernández y Fundora (1996) y Fernández y Garcés, (1997). En nuestro país la nueva versión de la Clasificación Genética de los suelos Hernández et al., (1995), al clasificar los mismos reconoce los siguientes tipos:

Vertisol Pélico y Vertisol Crómico, y los subtipos: típico, mullido, gleyco, gleyzado, cálcico y nodular ferruginoso; así como los géneros, carbonatado, medianamente lavado, sin carbonatos, salinizado y sódico.

Orellana (1996) y Cid et al ., (2001) al referirse a los suelos con arcillas dilatables indican que son difíciles de manejar debido fundamentalmente a su baja fertilidad física, y su susceptibilidad a inundarse en época lluviosa. Debido a estas restricciones, su potencial agrícola total no se alcanza, por lo que se necesita la aplicación de tecnologías que se adapten a sus características. Reconocen como los principales problemas de los Vertisoles aquellos que están relacionados con los mecanismos de transferencia y economía del agua, lo que dificulta su manejo, advierten además, sobre la necesidad de determinar sus propiedades mediante parámetros más integradores (Porosidad textural, Porosidad estructural estabilizada y el

coeficiente de contracción textural), de manera que se pueda evaluar la degradación física a nivel de horizonte y prever la posible destrucción del suelo a nivel de perfil, lo que evitaría un peligro ambiental de grandes dimensiones. Se pueden presentar también, daños a la parte principal del sistema radical de la caña de azúcar establecida en estos suelos (Makeeva y Lapitsky, 1990; MINAZ, 1998). Estas limitaciones implican buscar métodos que caractericen sus propiedades con exactitud, dentro de los cuales el análisis fractal es una alternativa según Oleschko (1997). Otros autores como Chenu y Tessier (1998), aplicaron la microscopia electrónica de bajas temperaturas para el estudio de los compuestos orgánicos y arcillosos y su incidencia en la microestructura de los Vertisoles. En Cuba, Millán y Benito (1998) utilizaron conceptos y leyes de la Geometría Fractal para el estudio y caracterización de las propiedades de los suelos arcillosos con problemas estructurales y de sobrehumedecimiento, estudios que permitió a Millán et al ., (2001) demostrar como la condición estructural del suelo bajo efecto de mejoradores orgánicos reduce el dominio de su comportamiento fractal.

En trabajos conducidos por Cairo (1986) referentes al manejo de los Vertisoles se señala como principales limitantes de estos suelos a las propiedades físicas y no las químicas. De acuerdo con sus resultados la aireación de estos suelos varía en rangos muy estrechos, en el perfil se encuentran valores frecuentes de cero, en los que la capacidad de campo constituye la porosidad total. Refiere también, que las características de elevada plasticidad, alta dilatación y contracción se mantienen prácticamente invariables en todo el perfil, bien sea debido a su génesis o como resultado del establecimiento de incorrectos regímenes de riego. Desde el punto de vista químico se caracterizan por valores de pH desde fuertemente ácidos hasta ligeramente ácidos, con un valor medio de 5. En ninguno de los casos el valor V alcanzó el 100 %.

Si se comparan estos resultados con estudios realizados en Vertisoles de otras regiones del país por Agafonov (1978) y Angarica et al ., (1984), en ellos se demuestra su carácter neutro a alcalino debido a que se forman a partir de materiales de origen carbonatado.

A criterio de Otero et al ., (1998), la capacidad de intercambio catiónico de la mayoría de los Vertisoles está comprendida entre 40 y 70 cmol (+). Kg⁻¹, lo que se considera alta, dada por el

predominio de arcilla en el intercambio catiónico, aunque la materia orgánica tiene una participación destacada en dicho proceso.

León (1990), al caracterizar los Vertisoles de la zona norte de la Provincia de Ciego de Ávila indica que los contenidos de calcio y magnesio son altos. La relación sílice-sesquióxidos está comprendida entre 3.5 – 4.0. Destacándose también, por una elevada capacidad de cambio catiónico, superior a 40 meq/100g y la que en ocasiones alcanza hasta 80 meq/100g. La saturación por bases en el complejo absorbente es también elevada.

En su descripción sobre las características de los Vertisoles, Hernández et al., (1995) reportan alta capacidad de cambio catiónico con predominio de las bases cambiables calcio, magnesio y sodio. Tienen un alto contenido de arcilla y aunque predomina la Montmorillonita también se encuentra Illita o Clorita; su porcentaje de materia orgánica está generalmente entre 4 - 6 % y el pH oscila entre 7.0 - 7.5.

2.2. Manejo Tecnológico y Agronómico de los suelos. El caso específico de los Vertisoles y sus propiedades físicas.

Orellana et al., (1995) al abordar aspectos relacionados a prácticas agronómicas y tecnológicas y su impacto en las propiedades físicas de los suelos refiere, que la aplicación indiscriminada de fertilizantes minerales induce variaciones en su estado físico, cambios en el pH y relaciones catiónicas no óptimas, lo que agudiza los procesos de degradación, siendo la pérdida de materia orgánica la principal causa de ese deterioro. Se requiere entonces, de prácticas de conservación y manejo de suelos que garanticen su rehabilitación (IFA, 1999).

Esta problemática hace que Roggiero et al.,(2001) consideren que la agricultura intensiva es la principal causa del empobrecimiento de la materia orgánica del suelo y por tanto de su deterioro. De esta forma se plantea el proceso de “Land Farming” como una alternativa interesante para incrementar su contenido, mejorar las propiedades físicas y solucionar el destino de los residuos orgánicos industriales.

Entre las propiedades físicas que definen el comportamiento agronómico, tecnológico y el manejo de los Vertisoles, se encuentra su composición granulométrica. Resultados al respecto presentan Lorenzo et al., (1998) quienes refieren que esta propiedad es poco dinámica y prácticamente no varía ante diferentes prácticas de manejo; si embargo, determina en gran medida el uso agrícola de los suelos. Al respecto, Salgado et al., (2001) concluyen que la textura de un Vertisol dedicado al monocultivo de la caña de azúcar por más de 30 años en forma continua se modificó de arcillosa a arcillo arenosa debido a la reducción del contenido de limo y arcilla, proceso que se favoreció por las altas precipitaciones y el agrietamiento, lo que provocó pérdidas de arcilla hacia los horizontes inferiores.

Otra propiedad física que define el manejo de los suelos es el estado de la microestructura (agregados con diámetros inferiores a 2 mm). Resultados de Ruiz et al., (1997) con respecto a las características de las sustancias húmicas presentes en microagregados, indican que los ácidos húmicos y fúlvicos de los Vertisoles presentan una estructura menos polimerizada y son de menor tamaño y peso molecular que la de los Ultisoles y difieren en cuanto a estructura química y grupos funcionales, lo que está determinado por el tipo de arcilla y las condiciones de drenaje. Cuando una alta tensión es aplicada al suelo (por ejemplo, durante su rápida inmersión en agua), las partículas primarias, los microagregados y los interagregados son liberados de los agregados inestables, los microagregados que quedan se caracterizan por su alta estabilidad y por estar enriquecidos de C y N (Puget,1996; Angers et al., 1996; 1996a; 1996b; Le Bissonais 1996; Le Bissonais y Arrouays 1997).

Las propiedades físicas de los suelos están determinadas en gran parte por la textura y su estructura, siendo esta última la que puede ser sometida a mayores modificaciones en función del laboreo y otras alternativas (Cairo, 1982). Autores como Palma et al.,(1998) y Elizalde y

Rondón, (1998) al referirse a la estructura del suelo como una propiedad dinámica condicionada por la interacción de las fases sólidas, líquidas y gaseosas que garantiza su funcionamiento como medio ecológico y objeto de las operaciones tecnológicas, indican que ella constituye uno de los principales índices para evaluar la degradación de los Vertisoles. Al respecto, Voronin (1990) y Smith et al.,(1990) la consideran como la base principal de la Física de Suelos y Cairo et al.,(1995) como una propiedad que determina también en cierto grado su fertilidad general.

Los Vertisoles se caracterizan por presentar una capacidad de formación de agregados de valor agronómico (0.5–5 mm) muy limitada y normalmente una gran cantidad de arcilla se mantiene en estado disperso, formando una estructura fuerte de agregados (bloques), predominando a criterio de Orellana (1997) terrones de grandes dimensiones agronómicamente no valiosos. Como consecuencia de lo anterior se produce una fuerte cementación, la cual según Cairo et al., (1996), es intensa en estos suelos, fundamentalmente cuando la materia orgánica ha sido coagulada por los iones calcio, se produce entonces, una acción antimojante alrededor del agregado que los protege del contacto con el agua. Estos efectos combinados de la materia orgánica provocan el aumento de la cohesión del agregado y la disminución de su estallido. De aquí, la importancia de la medición de las formas estructurales, las que incluyen a la densidad aparente como función de la porosidad del volumen de macroporos (Fox et al., 1998a, 1998b). Tarawally y Frómeta (1998) encontraron que la ruptura de la estructura del suelo, especialmente en condiciones adversas de humedad, los hace más vulnerables a compactaciones posteriores. Además, un aumento en la humedad del suelo provoca una debilitación de los agregados y propicia una mayor deformación del mismo al someterlo al estrés.

Lorenzo et al.,(1998) al tratar un Vertisol con vinaza diluida encontró cambios importantes en el estado estructural del mismo, con valores del coeficiente de estructura de hasta 2.90 en la profundidad de 20 cm. Es la labranza periódica en los suelos cultivados la que rompe los agregados y expone los compuestos orgánicos anteriormente protegidos (Balesdent et al ., 1996; 1998 y Besnard et al ., 1996).

Con relación a la densidad del suelo como una importante propiedad que define la aplicación de prácticas de uso y manejo en los Vertisoles, se puede plantear que generalmente es alta en estos suelos. En la India, el rango estimado por el método del terrón seco es de 1.5 a 1.8 kg. m⁻³.10³; sin embargo, se han observado valores de 2.0-2.5 kg. m⁻³. 10³ en suelos de Texas. (Ruiz y Cerda, 1995).

Los citados autores plantean, que los valores de densidad aparente varían considerablemente con el contenido de humedad, ya que al aumentar una propiedad la otra tiende a disminuir y viceversa, lo que se debe a una mejor circulación de agua como consecuencia de una mayor porosidad total, ello se logra al modificarse la estructura del suelo como consecuencia de la aplicación de acondicionadores orgánicos. Las propiedades del suelo relacionadas con el espacio poroso a criterio de Oberg y Salfords (1998), se modifican con variaciones en el contenido de la fase líquida. Es la densidad aparente de los agregados según Filgueira et al., (2001) una propiedad del suelo que daría prueba de su comportamiento fractal.

Lorenzo (1998) señaló que la densidad del suelo caracteriza la disposición mutua de las partículas y agregados del suelo, dependiendo su valor de la composición mecánica, la estructura y el contenido de materia orgánica. Esta importante propiedad se relaciona directamente con la compactación del suelo, lo cual es típico en suelos con características vérticas.

Si tenemos en cuenta que actualmente en nuestro país, más del 70 % del área de los suelos pesados dedicados al cultivo de la caña de azúcar están sometidos a los efectos de la compactación por el empleo de la maquinaria agrícola, los métodos agrotécnicos para el mejoramiento físico de estos suelos deben extremarse (Cairo, 1996).

Cid (1992) al estudiar el fenómeno de contracción-dilatación en suelos con arcillas dilatables del Valle del Cauto, encontró que el sistema poral de estos suelos es muy heterogéneo, estando compuesto fundamentalmente por grandes grietas de encogimiento entre macizos, por fisuras dentro de los macizos y por microporos en la matriz del suelo. Esta porosidad es la responsable del flujo de agua y aire.

La valoración cuantitativa de la estructura del suelo como base física de su fertilidad no es posible sin la representación detallada del espacio poroso, de su dinámica y relación con el contenido de humedad, lo cual es fundamental en los suelos en que predominan arcillas dilatables (Boiffin y Monnier, 1982; Cairo, 1995; Orellana, 1996 y Cabrera, 1998). Es imprescindible conocer según Ortiz et al., (2001) el régimen hídrico de los Vertisoles como un aspecto esencial para su uso y manejo, así como para la aplicación correcta del riego y el drenaje, al considerar que en Cuba más de 751 520 hectáreas de suelos llanos están afectados por sobrehumedecimiento, en la mayoría de los casos pesados, en los que se dificulta el movimiento vertical del agua. A criterio de Fonseca (1995), valores cercanos al 50 % de capacidad campo; es decir, próximos al volumen del espacio poroso total es característico de los Vertisoles (Romanovski, 1987; Orellana, 1991; Sánchez y Varona, 1992; Cabrera et al., 1996, 1997, 1998, 1999). Debido a esto, bajo algunas condiciones, según Voronin (1984), toda el agua contenida en el suelo puede pertenecer a la categoría de enlazada, la aireación del suelo es prácticamente nula y se desarrollan procesos típicos de anaerobiosis. Por tanto, el manejo correcto del régimen hidroaéreo de los Vertisoles es lo que garantiza condiciones adecuadas para el desarrollo de los cultivos. Cid et al., (1997) plantean que en los suelos arcillosos, sobre todo aquellos ricos en esmécticas esto resulta una tarea compleja, ya que existe una estrecha relación entre el estado de hidratación y la geometría del espacio poroso,

debido fundamentalmente a los procesos de contracción-dilatación. Se impone entonces, a criterio del Ministro del Azúcar (1999), la necesidad de realizar un manejo integrado de los Vertisoles con tecnologías sostenibles en la producción cañera.

2.3. Enfoque agrofísico de carácter energético en la evaluación del mejoramiento de suelos. Diagrama del estado físico del suelo.

Según Voronin (1990), el estado físico del suelo es el resultado de la interacción de los componentes minerales, orgánicos, líquidos, gaseosos y biológicos del suelo. La concepción más actualizada sobre las categorías de humedad del suelo y "constantes hídricas" se fundamenta en el enfoque termodinámico riguroso del comportamiento del agua en el suelo y sobre todo en la dependencia del potencial de humedad con la humedad del suelo (Ψ_w). Aunque algunas partes de esta dependencia haya que formularla desde el punto de vista matemático ya que no son categorías discretas (discontinuas), determinadas por zonas de tránsito con los cuales pueden relacionarse las denominadas "constantes hídricas"; dichas zonas se vinculan con una serie de importantes parámetros agrofísicos y edáficos, puesto que el carácter de la interacción del agua con la fase sólida de cada suelo concreto tiene sus particularidades.

Voronin (1984), infirió la correlación del potencial de humedad con el estado estructural del suelo según su porosidad y su consistencia físico-mecánica, donde los valores de sus correspondientes potenciales de humedad yacen sobre las rectas dadas por las siguientes ecuaciones:

- $\lg \Psi = 4.2 + 3 W$ Agua constitucional o de adsorción laminar
- $\lg \Psi = 1.17 + 15W$ Agua de unión laminar
- $\lg \Psi = 1.17 + 3W$ Agua capilar-laminar
- $\lg \Psi = 1.17 + W$ Agua capilar
- $\lg \Psi = 1.17$ Agua gravitacional

La intersección de las rectas que se obtienen en estas ecuaciones con las curvas de retención de humedad expresa los valores de humedad del suelo de tránsito de una categoría de agua a otra, permitiendo determinar dichos valores.

Las dependencias establecidas por Voronin (1984), permiten determinar a partir de la curva de retención de humedad los intervalos en los cuales el suelo se comporta como un cuerpo elástico viscoso y viscoso-plástico, lo cual resulta de inestimable valor práctico.

Además de la intersección de las rectas con la curva se obtienen los potenciales correspondientes al límite de contracción (Ψ_{ac}), el primer potencial crítico (Ψ_{ct}) y el potencial de sorción capilar máximo (Ψ_{acm}); el que se relaciona con diversas propiedades de los suelos función de su estructura como son: el límite inferior de plasticidad o límite plástico (W_{lp}), el límite superior de plasticidad o límite líquido (W_{ll}) y la humedad a capacidad de campo (W_{cc}), entre otras.

Autores como Orellana et al.,(1986), Lorenzo (1992), Cabrera (1998), Curbelo (1998) y Peña, (1999), emplearon estas curvas en el cálculo de importantes propiedades físicas e hidrofísicas, las que al compararse con las obtenidas por métodos tradicionales, mostraron resultados alentadores.

Sapochnikov y Projorov (1990) afirman que a la hora de evaluar la fertilidad de los suelos, los parámetros físicos fundamentales son la densidad, las propiedades estructuro-mecánicas, la superficie específica, el contenido de humedad, las propiedades hidrofísicas, pero principalmente, la curva de retención de humedad. Estas curvas pueden ser representadas en forma de diagramas, los que resultan de gran utilidad para evaluar propiedades relacionadas con la retención de humedad y la conductividad hidráulica (Kosugi, 1997a ,1997b; Mollands et al., 1996; Leong y Rahardo, 1998).

Voronin (1984), propuso un nuevo enfoque para la determinación de la dependencia $\Psi_w(w)$, como resultado de la fuerte influencia que la superficie de la parte sólida del suelo ejerce sobre la molécula de agua que interactúa con ella. La dependencia $\Psi_w(w)$ de las láminas absorbidas se diferencia de la que se absorbe en las láminas húmedas.

En el caso de las láminas absorbidas se hace necesario determinarla experimentalmente y para el caso de las láminas húmedas se propone la expresión:

$$\Psi_i = -A \left[\frac{W_i - W_a}{W_{me}} \right]^{-n} \quad (1)$$

$$\log |\Psi_i| = |\log A| - n \log \frac{W_i - W_a}{W_{me}} \quad (2)$$

Donde W_a es la cantidad de agua en la capa de absorción e igual a la suma de la monocapa calculada. W_{me} representa la cantidad de agua retenida en la capa externa de la lámina de adsorción y es en esencia la cantidad de agua necesaria para la formación de la primera capa de la superficie de separación líquido-gas de la capa de adsorción. Por otra parte, A y n son parámetros característicos de cada suelo y pueden ser calculados sobre la base de los resultados de la determinación experimental de los segmentos de la curva hidrofísica fundamental.

Si transformamos la ecuación (1) en forma logarítmica, obtenemos una línea recta cuya intersección con la ordenada nos permite hallar el valor numérico de A y cuya pendiente es igual al parámetro n . Puesto que para el trazado de la recta es suficiente sólo varios puntos, entonces se pueden tomar únicamente aquellos datos experimentales relativamente fáciles y confiables, y determinar el potencial del agua para los contenidos de humedad correspondientes.

De esta forma la esencia de este método para la determinación de la curva hidrofísica fundamental del suelo, consiste en la determinación experimental de sólo aquellos intervalos de la curva que son difíciles de formalizar, debido a las heterogeneidades geométricas y energéticas de la parte sólida del suelo o a la irregularidades de los vacíos, especialmente en los suelos agregados (en el diapasón de las fuerzas capilares). Sobre la base de estas mediciones se determinan A y n , y a continuación por medio de la expresión (2), se calcula el intervalo de la curva, donde el trabajo experimental se hace difícil.

La aplicación del método termodinámico para caracterizar las propiedades de los Vertisoles se muestra por tanto, como una herramienta muy útil para evaluar las modificaciones que experimentan éstos, cuando son sometidos a diferentes prácticas de manejo.

2.4. Actualidad y perspectivas sobre la utilización de los residuos orgánicos de carácter industrial en el mejoramiento y manejo de suelos.

Hasta hace pocos años, se pensaba que los abonos químicos bastaban para mantener la fertilidad de los suelos; no obstante, se observó que era necesario aumentar incesantemente las dosis de abonos minerales para mantener los niveles productivos de las cosechas. Esta realidad hizo pensar que los abonos químicos constituyen solo una parte, importante en sí, pero insuficiente de lo que el suelo necesita para mantener su fertilidad (Ángel y Vázquez, 1998).

Surge así, la necesidad de utilizar los abonos orgánicos en la agricultura como una alternativa para restituir a los suelos, al menos en parte, lo que se extrae con la producción agrícola y lograr el mejoramiento de sus propiedades físicas (Paneque, 1998). El efecto directo que produce la aplicación de abonos orgánicos en los suelos, se materializa en el incremento de los contenidos de materia orgánica y la influencia que la misma ejerce sobre las características químicas, físicas y químico-físicas de los suelos, lo que sobrepasa su participación cuantitativa, de ahí la importancia de su estudio (Kouda y Rozanov, 1990; Leinweber y Schulten, 1998).

En este sentido, si la función de la materia orgánica fuese únicamente aportar nutrientes al suelo, en especial nitrógeno, tendría poco interés, ya que la fertilización mineral actúa en este sentido cuantitativamente con mayor rapidez. Sin embargo, su papel en el suelo es mucho más importante, y por ello insustituible (Labrador, 1997).

Para Bontoux et al.,(1998) el bajo contenido de materia orgánica (natural o debido a pérdidas), es un grave problema para asegurar el mantenimiento de buenas propiedades de los suelos. En este sentido se pueden utilizar residuos para mantener, restaurar o crear fertilidad, así como para lograr una estructura adecuada en tierras degradadas. Yagodin (1986), demostró la importancia de la materia orgánica en la fertilidad y capacidad productiva de los suelos como fuente nutritiva para los organismos heterotróficos, destacó su papel decisivo en las propiedades físicas (estructura y capacidad de retención de humedad), contribuyendo al buen drenaje, aireación del suelo y disminución de su densidad aparente, así como al suministro de agua a las plantas, a lo que se añade su influencia en las características químicas, como la capacidad de intercambio catiónico y suministro de nutrientes a las plantas. Por su parte, Shein et al., (1995) consideran que la misma además, de constituir la principal fuente de nitrógeno para las plantas (más del 95 % del nitrógeno total del suelo), es a la vez fuente de fósforo, azufre y potasio.

Las sustancias orgánicas influyen en la vida del suelo y su fertilidad; los ácidos orgánicos participan en la descomposición de los minerales, mientras que otros ejercen efectos estimulantes e inhibidores sobre el crecimiento y desarrollo de los vegetales (Cairo y Fundora, 1994).

Para Orlov (1990) la materia orgánica contribuye a la adsorción de plaguicidas, lo cual influye en su efectividad y residualidad, interviene en el color del suelo, pues favorece o dificulta la adsorción de radiaciones solares, lo que es de importancia para el balance térmico y determina su capacidad buffer contra cambios bruscos del pH. De esta forma, la aplicación de materia orgánica al suelo juega cuatro funciones: nutritiva, biológica, física y físico-química (Weber, 1999).

La materia orgánica aunque siempre ha ocupado uno de los lugares centrales en la Pedología Teórica y Práctica, en la actualidad se hace más agudo el problema de la misma en el suelo,

debido a su disminución en condiciones de una agricultura intensiva, donde en la mayoría de los casos no se toman las medidas necesarias para su retorno a los suelos, constituyendo ello una de las causas fundamentales de su degradación (Primavesi, 1995; Rodríguez, 1997; Preciado, 1997).

En los trabajos conducidos por Cairo et al., (1996) se destaca el papel de la materia orgánica y el sodio sobre el agua disponible y otros índices físico-químicos. Sus resultados demuestran como en la medida que aumenta la materia orgánica, aumenta el agua disponible y la aireación.

La utilización de residuos líquidos son otra alternativa para incorporar a los suelos materia orgánica y nutrientes, esto hace que su empleo como abono y mejoradores de las propiedades de los suelos, se generalizara en los últimos años en la irrigación de los campos cañeros (Metodología Nacional de Fertiriego, 2002).

El Ministerio del Azúcar (1998) en su estrategia referida a esta práctica, recomienda utilizar residuos que garanticen un aporte de material orgánico importante a los suelos, como es el caso de los provenientes de la agroindustria azucarera, fundamentalmente la vinaza de destilería y los residuos de elaboración de levadura torula. Arzola et al., (1998) establecen un orden de prioridad en cuanto a su aplicación, de manera que su empleo sea dirigido a contrarrestar importantes factores limitantes en las áreas cañeras. Investigadores como Ramírez et al., (2001) al evaluar los efectos de la adición de aguas residuales industriales tratadas en la dinámica del carbono y el nitrógeno sobre las características de distintos tipos de suelos, demostraron como el riego con éstas, por más de 90 años provocaron incrementos en los contenidos de materia orgánica, pero a su vez se produjo un efecto significativo en la concentración de algunos metales pesados.

La conclusión presentada por Janse (1998) en el Programa de Biosólidos de Ontario, Canadá, establece que la aplicación de residuos orgánicos en tierras agrícolas es una alternativa económica, ambientalmente segura y productiva de los desechos industriales, tal como ocurre con los mostos de destilerías.

Mora et al., (2001) al estudiar el efecto de diferentes sistemas de labranza sobre las propiedades físicas de Vertisoles demuestran el efecto conservador que los residuos orgánicos ejercieron sobre la humedad del suelo, al mejorar la distribución del agua en el perfil, efecto que se acrecienta cuando se incorporan residuos que contienen materia orgánica disuelta como es el caso de la vinaza.

El Comité de Uso de Biosólidos (2000) enfatiza que el reciclaje de residuos orgánicos, es una alternativa de eliminación ambientalmente segura, que reduce la demanda de fertilizantes comerciales, mejora la fertilidad del suelo, la retención de humedad e impermeabilidad, a la vez que aporta materia orgánica y representa un beneficio económico.

Salcedo (2000), al referirse a los cambios producidos en suelos agrícolas a los que se aplicaron lodos deshidratados y composta de lodos fueron: mejora el pH, incremento de la materia orgánica y del contenido de macronutrientes (N total de 150 a 160 mg.kg⁻¹ y P de 2.31 hasta 14.01 mg.kg⁻¹).

Algunos residuos presentan características según refieren Otero et al.,(1997) que implica no puedan ser utilizados en la agricultura, ya que contienen sustancias tóxicas que en concentraciones superiores a ciertos niveles y en determinadas condiciones del medio pueden producir efectos sobre los vegetales y las personas, así como contaminación de los suelos y aguas subterráneas. Independientemente a esto, los países más desarrollados de la Comunidad Europea utilizan en la agricultura un alto porcentaje de su producción de residuos; por ejemplo, Alemania dedica el 45%, Inglaterra el 55%, Francia el 38%, Italia el 32%, mientras que Estados Unidos dedica en su agricultura el 42%.

2.5. Utilización agrícola del residuo de destilería. (vinaza)

Un residuo de amplias posibilidades de uso en la agricultura por la cantidad de materia orgánica y nutrientes que aporta es la vinaza, la que es utilizada en distintas zonas cañeras del mundo, en este sentido se destaca Brasil, donde representa una importante alternativa teniendo en cuenta las características de los suelos deficientes en potasio y los altos contenidos de este elemento en el efluente (Dantur, 1996).

La vinaza según Alfaro (2000), es un residuo industrial del proceso de destilación de alcohol, cuyo volumen generado es elevado, ya que por cada litro de alcohol obtenido se producen como promedio 13 litros de vinaza. Debido a su alto contenido de materia orgánica y nutrientes, este residuo presenta una elevada Demanda Bioquímica de Oxígeno (D.B.O), convirtiéndolo en un agente muy contaminante del medio ambiente.

En Brasil el uso de sistemas de aplicación de vinaza en camiones tanques resulta viable económicamente hasta distancias que superan los 30 Km desde la destilería o zona de embalse, debido a que con el efluente se reemplaza a un fertilizante mineral del tipo NPK de alto costo. Los sistemas de aplicación de la vinaza como fertilizante en la caña de azúcar, cualquiera que sea el sistema de transporte y distribución que se utilice, hace necesario contar con un área de embalse o seguridad, la que servirá como destino intermedio para ser enfriada y acopiada en los períodos en que sea imposible su uso directo, ya sea por razones climáticas u organizativas. La capacidad de las áreas de acopio de vinaza dependerá del esquema de distribución planteado, debiéndose tener en cuenta los volúmenes generados y los períodos medios de almacenamiento (Pérez et al ., 1996).

Existen reportes, como los descritos por Veitía (1991) sobre los efectos positivos de aplicaciones de diluciones de vinaza en las características agrofísicas de suelos Oscuros plásticos, y sobre los rendimientos del cultivo de la caña de azúcar. Otros autores como

Bautista et al., (2001) en un experimento en condiciones de invernadero evaluaron los cambios químicos ocasionados por la adición de materia orgánica disuelta (MOD) tipo vinaza en suelos con condiciones de extrema sequedad para el cultivo de la caña de azúcar como el Acrisol y Fluvisol. Tres tipos de materia orgánica disuelta fueron utilizados, vinaza cruda (VC), vinaza con tratamiento aeróbico (VA) y vinaza con tratamiento aeróbico-anaeróbico (VAA).

En ambos suelos, la VA y VAA no generaron problemas de salinidad, la tasa de mineralización del carbono orgánico soluble (COS) de la VC fue casi cuatro veces mayor en el Acrisol que en el Fluvisol, lo que disminuye el riesgo de contaminación de los cuerpos de agua, se demostró además, que los cambios químicos ocurridos en los suelos por aplicaciones de VC son favorables desde el punto de vista agrícola.

Dantur et al., (1996) indican que a la hora de tomar la decisión de dar uso agrícola a la vinaza, no se puede dejar de considerar su composición química dentro de lo que se destaca su elevado contenido de materia orgánica y sales solubles, predominando las de potasio. Los resultados de la experiencia demuestran que en caña planta puede usarse vinaza sin limitaciones hasta dosis de $150 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$, con las que se obtiene una buena brotación y crecimiento lineal, incluso la dosis puede alcanzar hasta los $300 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$, sin mayores riesgos. Refieren además, que las aplicaciones de vinaza sobre las cañas socas provocaron incrementos sustanciales en los rendimientos.

Skandalariallis et al., (1995) señalan que la vinaza puede ser utilizada como fuente de nitrógeno en la caña de azúcar, al no provocar modificaciones sustanciales en los rendimientos fabriles, aunque aplicaciones en volúmenes superiores a $300 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ no se recomiendan debido a que pueden provocar disminuciones significativas en la calidad de los jugos. Con respecto a la influencia sobre las propiedades del suelo, la vinaza por sus

características químicas induce procesos de degradación si se aplica de una manera inadecuada, al incrementar la concentración salina en forma directa a los volúmenes aplicados; sin embargo, los incrementos en dicha concentración y el pH fueron bajos para las dosis de vinaza recomendadas ($150 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$). Al suspenderse las aplicaciones, estos parámetros descendieron a sus valores originales, punto que se alcanza en uno o dos años en dependencia de las precipitaciones que ocurran. Con posterioridad, se registraron incrementos del nitrógeno nítrico, fósforo disponible y potasio intercambiable, al tiempo que se produjo una disminución de la conductividad hidráulica.

García y Vázquez (2000), consideran que el drenaje es el principal factor limitante que afecta los rendimientos del cultivo de la caña de azúcar en los Vertisoles, lo que puede ser atenuadas por el empleo de residuos de la agroindustria azucarera a partir de su aporte en materia orgánica y nutrientes. Se destacan entre ellos, los residuales líquidos del procesamiento de azúcar crudo, los mostos de torula y sobre todo la vinaza de destilería.

Hoeft (1999) al realizar estudios con diferentes dosis de vinaza, las que se fijaron sobre la base de la cantidad de potasio en el suelo y necesaria para el cultivo, emplearon la alternativa de diluirla en agua para evitar posibles daños (quemadura).

En las socas comparó 3 dosis de potasio (50,75 y 125 kg de $\text{K}_2\text{O}/\text{ha}$), utilizando como fuente la vinaza y el cloruro de potasio respecto a un testigo (0 Kg de $\text{K}_2\text{O}/\text{ha}$), las dosis de vinaza evaluadas fueron 20, 37 y $62 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ en forma pura y diluida (25%).

En los resultados de las tres cosechas no se presentaron diferencias significativas en ninguna de las variables evaluadas, a pesar de que con la dosis de 135 litros de vinaza ($125 \text{ kg de } \text{K}_2\text{O} \cdot \text{ha}^{-1}$), se obtuvo entre 5% y un 14% de diferencia en azúcar respecto al testigo. En el segundo y tercer corte el tratamiento con $37 \text{ m}^3/\text{ha}$ de vinaza ($75 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \text{ K}_2\text{O}$) superó al testigo en la producción de azúcar entre un 19% y 25%, así como a los tratamientos con fertilizante químico. Se concluye que donde se utilizó fertilizante químico los cortes no fueron tan

positivos como los de la vinaza, posiblemente por su aporte en otros nutrientes también esenciales para el cultivo. La dilución no pareció afectar los rendimientos. Los análisis de suelo demostraron que la vinaza aumentó el pH del suelo, disminuyó el aluminio intercambiable e incrementó la concentración de potasio. También se mejoró las relaciones intercatiónicas, principalmente entre el calcio y el magnesio.

Vidal y Gutiérrez (1997) refieren sobre los beneficios que se logra en el mejoramiento de suelos pesados, cuando se emplean métodos combinados que incluyen medidas de drenaje y mejoradores orgánicos como la vinaza.

Gómez (2000) al evaluar durante tres años consecutivos (plantilla, soca I y soca II) el efecto de la aplicación de diferentes dosis de vinaza complementada con fertilización mineral, en la productividad de la caña de azúcar y en algunas propiedades de un Vertisol, encontró incrementos de los rendimientos sin afectación en la calidad de los jugos. Mediante estas aplicaciones se puede sustituir el 55 % del nitrógeno, el 72 % del fósforo (P_2O_5) y el 100 % del potasio (K_2O) provenientes de la fertilización mineral. Los mejores rendimientos se obtuvieron cuando se incorporaron $50 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ de vinaza en plantilla y $100 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ en soca I y soca II en los primeros 0.20 m del suelo. La aplicación de vinaza incrementó significativamente el contenido de potasio intercambiable y ligeramente el contenido de fósforo disponible en los tres ciclos del cultivo, no afectó el pH ni los niveles de sales del suelo, así como tampoco modificó el contenido de materia orgánica.

Rodríguez et al., (2000) al determinar en el laboratorio el efecto de la aplicación de seis dosis crecientes de vinaza (0 – 100 – 200 – 300 – 400 y $500 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$), las que se aplicaron en tubos de P.V.C. (columnas) de 1,20 m de altura y fueron introducidos previamente en forma vertical en los dos suelos (Dystric haplustands y Ustic humitropept), encontró en sus propiedades

químicas transcurridos 105 días luego de la aplicación una relación directa entre la adición de vinaza con las diferentes dosis y dichas propiedades. El pH medido tanto en agua como en cloruro de potasio se incrementó, así como las concentraciones de P, K, Ca, Mg, S, Mn, los contenidos de materia orgánica, bicarbonatos, bases totales, cloruros, conductividad eléctrica y la CIC para los dos suelos. Las concentraciones de Al en ambos suelos disminuyeron en relación directa con la dosis aplicada. Las mayores dosis de vinaza (300, 400 y 500 m³. ha⁻¹), verificaron los mayores incrementos en las propiedades químicas, destacándose en este sentido, el tratamiento de 500 m³. ha⁻¹. De igual manera, se presentó una relación directa con el grado de sedimentación de los sólidos por parte de la vinaza en el suelo y con el desarrollo de microorganismos como hongos y bacterias, lo cual fue observado durante toda la investigación. Los datos analizados revelan que la adición de vinaza en el Dystric haplustands aumentó los contenidos de las diferentes variables químicas con respecto al Ustic humitropept, lo que evidencia el efecto aditivo que la vinaza produce en el suelo.

Salas (1999) por su parte, encontró efectos favorables sobre las características físico-químicas de Vertisoles al utilizar diferentes dosis de vinaza e incrementos sustanciales en los rendimientos de la caña de azúcar con dosis de hasta 250 m³/ ha durante dos cosechas sucesivas.

Sulroca (1995) al referirse a los residuos líquidos de destilería plantea que la dosis media para su aplicación deben oscilar entre 250-300 m³/ha con un riego en todo el ciclo de la plantación. Estos efluentes poseen una alta potencialidad para utilizarse en la sustitución de la fertilización mineral de la caña de azúcar, lo que combinado con técnicas de fertiriego en el marco de un modelo de fertilización orgánica pueden suplir alrededor del 50% de las necesidades nutricionales que demanda la agricultura cañera cubana.

El empleo de otros mejoradores como la cachaza y el yeso se han utilizado con resultados favorables en Vertisoles como reportan Curbelo (1998b) y Cabrera (2000).

3. MATERIALES Y METODOS.

3.1. Ubicación y características agroecológicas de la zona donde se desarrollaron los experimentos. Descripción morfogenética y clasificación de suelos.

Los experimentos que se analizan en el presente trabajo se desarrollaron en áreas de producción del Complejo Agroindustrial "Enrique Varona González" del municipio Chambas, provincia de Ciego de Ávila, entre los años 1992 y 1999, en la UBPC "Las Marianas". En los bloques 128, 206 y 215, con áreas respectivas de 70.9, 58.5 y 60.2 hectáreas.

Se realizó una caracterización inicial del área para lo cual se tomaron muestras de seis calicatas, dos por cada bloque, analizando seis perfiles, lo que permitió la clasificación los suelos a través del sistema taxonómico vigente. Los análisis se realizaron en el Laboratorio Provincial de Suelos y Fertilizantes de Ciego de Ávila. Las características morfogenéticas de tres perfiles típicos seleccionados correspondientes a los bloques experimentales aparecen en el anexo N°2.

Los suelos descritos según (Hernández et al., 1995) pueden clasificarse como sigue:

Agrupamiento: Vertisol.

Tipo: Oscuro Plástico no Gleyzado.

Subtipo: Negro grisáceo.

Género: Sobre materiales transportados, saturado.

Especie: Medianamente profundo, medianamente humificado, débilmente salino, carbonatado.

Variedad: Arcilloso, poco graviloso y sin piedras.

De acuerdo con la nueva versión de la clasificación genética de los suelos de Cuba (Ministerio de la agricultura 1995) el suelo objeto de estudio es un vertisol pelico típico (Typic Hapludert), correlacionando en la Soil Taxonomy con el orden Vertisol suborden Ustert y en el sistema de unidades FAO-UNESCO con la unidad Vertisoles. Estos suelos ocupan en el mencionado Complejo Agroindustrial conjuntamente con los suelos Sialítizados plásticos un área de 57 834 hectáreas, ello representa el 68.19 % de la superficie total cultivada de caña, siendo los más importantes y representativos en esa zona.

Según la Dirección Provincial de Recursos Hidráulicos (1998), los datos hidrológicos de la zona norte de la provincia de Ciego de Ávila son los siguientes:

- Profundidad de yacencia de las aguas subterráneas: variable entre 3 y 6 m de norte a sur, los valores máximos al sur de la zona se encuentran entre 14 y 16 m y los valores menores de 3 metros, hacia la costa.
- Los gradientes hidráulicos varían, según los períodos hidrológicos, en el intervalo 0.00080 – 0.0023 en el período húmedo, mientras que en el período seco disminuyen a 0.00040 – 0.0011.
- Las cotas absolutas de las aguas subterráneas en ambos períodos son variables: en el período seco oscilan en el rango 1.0 – 4.5 m y en el período húmedo de 1.0 – 5.0 metros. Esto asegura, que no existen riesgos de contaminación de estas aguas al

emplear las dosis de vinaza propuestas, pues siempre se recomienda una norma neta para llegar únicamente a humedecer el suelo hasta su capacidad de campo.

- La alimentación de las aguas subterráneas en esta zona y en toda la parte norte **de la provincia tiene lugar a partir de las precipitaciones.**

Los datos climáticos que se ofrecen provienen de la Estación Agrometeorológica "Camilo Cienfuegos", la cual está ubicada a los 22° 09' de Latitud Norte y 78° 45' de Longitud Oeste, a unos 2 Km del mencionado complejo.

La precipitación durante el periodo lluvioso de Mayo-Octubre oscila entre 635-1080 mm y en el periodo seco de Noviembre-Abril entre 283-437 mm. La temperatura mínima media anual es de 21°C y la máxima de 27°C. Con la información obtenida se confeccionaron los climatogramas que se muestran en el anexo N°1, de los que se infiere que el régimen pluviométrico de la zona es alto, se reporta los meses de Julio y Octubre como los de mayores precipitaciones.

3.2.Consideraciones generales acerca del montaje y conducción de los experimentos.

Como material investigativo, se utilizó además, el residuo de la producción de alcohol (vinaza) proveniente de la destilería "Nauyú", y la mezcla de éste con el residuo de producción de azúcar crudo del mencionado CAI. Las caracterizaciones químicas de los mismos se ofrecen en las Tablas N°1 y N°2.

Durante el montaje de los experimentos I y II, las labores de preparación de suelos y atenciones culturales se realizaron según el instructivo técnico vigente para el cultivo.

Los trabajos de investigación en condiciones de campo fueron conducidos según la metodología establecida por el Departamento de Suelos y Agroquímica del INCA (Villegas et al., 1983), con las siguientes especificaciones:

Parcelas de 32 m² cada una, con un espaciamiento entre ellas de 2 m y entre réplicas de 4 m. Cada parcela formada por 4 surcos de 5 m de longitud, separados a 1.60 m (considerándose estas dimensiones de la parcela como área neta de cosecha); las que fueron plantadas de caña de azúcar, utilizando propágulos con tres yemas y una densidad de 12 yemas/metro lineal. La variedad utilizada fue la C-266-70 según recomendaciones de Bernal et al ., (1997).

3.3.Características de los experimentos de campo.

3.3.1.Experimento N°1. Utilización del residuo de destilería (vinaza pura) como enmienda orgánica.

Para este caso se seleccionó un diseño experimental bloque al azar formado por cuatro réplicas y siete tratamientos, los cuales se relacionan a continuación:

Variante (testigo).

Variante 50 m³/ha.

Variante 100m³/ha.

Variante 150m³/ha.

Variante 200m³/ha.

Variante 250m³/ha.

Variante (fertilización mineral NPK).

La variante testigo no se fertilizó y recibió riego con aguas claras con norma parcial neta de 300 m³/ha.

Las variantes desde 50 m³/ha hasta 250m³/ha, recibieron las dosis de vinaza pura en el momento de la plantación que se indicaron con anterioridad.

La fertilización mineral se realizó según cartograma agroquímico de la empresa, para lo cual se tuvo en cuenta: tipo de cepa, características del suelo, niveles de fósforo y potasio, condiciones de hidromorfía y rendimientos esperados. Estos aspectos permitieron definir

las siguientes dosis:

60.2 Kg N.ha⁻¹ como Nitrato de Amonio (NH₄NO₃)

25 Kg P₂ O₅ .ha⁻¹ en forma de Superfosfato Triple (ST).

80 Kg K₂O.ha⁻¹ como de Cloruro de Potasio (KCl)

Las dosis de fertilizante mineral se aplicaron durante el ciclo del cultivo (caña planta y los restantes retoños), mientras que la vinaza pura se aplicó solamente en caña planta, valorándose su efecto residual a la quinta cosecha.

Se realizaron riegos con agua clara durante todo el ciclo teniendo en cuenta las exigencias hídricas del cultivo, con norma parcial neta de 300 m³/ha.

3.3.2.Experimento N°2. Utilización de la vinaza en dilución como agua para riego.

El diseño seleccionado fue un bloque al azar formado por cuatro réplicas y cinco tratamientos como se describe a continuación:

Variante 0D (Control): riego con agua clara y fertilización NPK(con igual dosis que la variante fertilizada en el experimento N°1).

Variante 1/2.5: riego con vinaza diluida en agua clara, relación 1:2.5

Variante 1/5: riego con vinaza diluida en agua clara, relación 1:5

Variante 1/10: riego con vinaza diluida en agua clara, relación 1:10

Variante 1/20: riego con vinaza diluida en agua clara, relación 1:20

Estas variantes representan las siguientes dosis de vinaza pura:

Variante 1/2.5: $120 \text{ m}^3 \text{ vinaza.ha}^{-1}$.

Variante 1/5: $60 \text{ m}^3 \text{ vinaza.ha}^{-1}$.

Variante 1/10: $30 \text{ m}^3 \text{ vinaza.ha}^{-1}$.

Variante 1/20: $15 \text{ m}^3 \text{ vinaza.ha}^{-1}$.

Lo cual representa al aplicarse dos riegos por ciclo las dosis:

240, 120, 60 y $30 \text{ m}^3 \text{ vinaza.ha}^{-1}$ para las variantes: 1/2.5, 1/5, 1/10 y 1/20 respectivamente.

La aplicación de las diluciones de vinaza se realizó durante caña planta y primer retoño (efecto acumulativo), a razón de dos riegos por ciclo con norma parcial neta de $300 \text{ m}^3/\text{ha}$. Momento a partir del cual se evaluó su efecto residual a la quinta cosecha. Los restantes riegos se realizaron con agua clara según las necesidades hídricas del cultivo.

La aplicación de vinaza pura y de las diluciones se efectuó mediante una carreta cisterna con volúmenes calculados para garantizar las dosis.

Para evaluar las modificaciones provocadas por el residuo en las diferentes alternativas de manejo sobre las propiedades que caracterizan el comportamiento químico y físico-químico del suelos, se tomaron muestras a profundidades de 0.00 – 0.20 m y 0.20 -0.40m en todas las variantes, una vez finalizada la cosecha y en cinco puntos de cada parcela. Se formaron dos muestras compuestas por cada tratamiento. Las muestras fueron tomadas en el tratamiento que recibió fertilización mineral en la zona donde se aplicaron los fertilizantes, mientras que donde se utilizó el residuo, éstas se recolectaron en toda el área de la parcela, teniendo como fundamento que el riego se realizó de manera uniforme.

En cuanto al análisis físico, fueron analizadas 2 profundidades (0.00 – 0.20; 0.20 – 0.40m) con el objetivo de evaluar la evolución que experimenta el estado físico del suelo al ser sometido a la acción de este residuo. Los muestreos se realizaron según las metodologías vigentes para cada tipo de análisis como refieren (Orellana 1991; Lorenzo 1992; y Cabrera 2000).

3.3.3.Experimento N°3.Extensión de producción. Riego tradicional con mezcla de residuos de destilería y de producción de azúcar crudo por más de quince años.

En el CAI "Enrique Varona" se aplica fertiriego a un total de 28 bloques cañeros, para este estudio se seleccionaron los bloques 206 y 215. El bloque 206, ha sido sometido a aplicaciones de mezcla del residuo de producción de alcohol con el de azúcar crudo por más de quince años, mientras que el bloque 215 ha sido regado

solamente con aguas claras. Estos bloques presentan los mismos tipos genéticos de suelos que donde se desarrollaron los experimentos N°1 y 2.

Para la selección de los campos de ambos bloques se tuvieron en cuenta los siguientes aspectos:

- Campos de suelos Oscuros plásticos no gleyzados bajo uso y manejo de la caña de azúcar.
- Bloque 206 regado por más de quince años con la mezcla de residuos de producción de azúcar crudo y de destilería, sin fertilizantes químicos y regado con agua freática.
- (Bloque 215 (control) regado tradicionalmente con agua freática y fertilización mineral con igual dosis que las variantes fertilizadas de los experimentos N°1 y 2.

El pesquisaje de campo para el estudio de las características químicas y se llevó a cabo durante tres cosechas sucesivas. (Campañas 1995-1996,1996-1997 y 1997-1998)

El muestreo de suelo se realizó en cuatro campos de cada bloque una vez cosechados. Se tomaron muestras con barrena agroquímica en cada uno de ellos siguiendo la diagonal de los mismos y estando formada cada muestra compuesta por 30 submuestras. La profundidad de muestreo fue de 0.00-0.10 y de 0.10-0.20 y 0.20-0.40 metros.

En la realización de los muestreos para análisis físicos se tuvieron en cuenta los mismos criterios que para los experimentos anteriores.

El riego con la mezcla del residuo de producción de azúcar crudo y destilería se realizó a razón de un riego por campaña con norma parcial neta de $400 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$, en

una proporción 1/6, teniendo en cuenta los volúmenes de residuales que generan estas fábricas. La técnica de riego utilizada es la de surcos.

3.4.Métodos.

3.4.1.Determinaciones químicas realizadas a las aguas residuales.

Con el fin de llevar a cabo la caracterización química del residuo de destilería (vinaza) y la mezcla de este con el residuo de producción de azúcar crudo, se realizaron las siguientes determinaciones, empleando las técnicas analíticas que se señalan a continuación:

<u>Determinaciones</u>	<u>Técnicas o métodos</u>
Determinación del pH:	Método potenciométrico
Conductividad eléctrica:	Método conductimétrico
Materia Orgánica:	Volumetría redox
Nitrógeno total (N):	Destilación en Kjeldahl.
Fósforo (P ₂ O ₅):	Técnica colorimétrica
Potasio (K ⁺):	Fotometría de llama
Sodio (Na ⁺):	Fotometría de llama
Calcio (Ca ²⁺):	Complexometría
Cloruros (Cl ⁻):	Volumetría por precipitación
Carbonatos (CO ₃ ²⁻):	Volumetría por neutralización
Hidrógeno - carbonato (HCO ₃ ⁻):	Volumetría por neutralización

3.4.2. Determinaciones químicas, físicas y físico- químicas realizadas a los suelos.

Para realizar los análisis de las propiedades químicas y físico-químicas del suelo evaluadas se tuvieron en cuenta los criterios que establecen las Normas Cubanas 51:99; ISO 10390:94; 52:1999; 93-03-111:1989 mediante las técnicas de análisis y métodos que se describen a continuación:

-Materia Orgánica: método colorimétrico, utilizando el dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$ 0.1667 mol/L), como oxidante y el ácido sulfúrico (H_2SO_4), como deshidratante. Lectura en el espectrofotómetro a 650 nm.

-Determinación del pH en agua: método potenciométrico. Relación suelo:agua 1:5 y tiempo de agitación de 5 minutos.

-Determinación del pH en cloruro de potasio: método potenciométrico. Solución extractiva de Cloruro de Potasio (KCl 1 mol/L). Relación suelo: solución extractiva 1:5.

-Determinación del fósforo y potasio asimilable. Método de Oniani. Solución extractiva de ácido sulfúrico (H_2SO_4 0.05 mol/L) y tiempo de agitación de 5 minutos. Lectura en el espectrofotómetro utilizando filtro rojo a 620 nm. El potasio asimilable se leyó la muestra directamente en el fotómetro de llama.

-Cationes cambiabiles. Método de Schatchabel. Extracción con acetato de amonio. (1 mol/L).

-El Ca^{2+} y el Mg^{2+} se determinaron por complexometría, utilizando como solución valoradora el EDTA a 0.01 mol/L. El K^+ y Na^+ se determinaron por fotometría de llama.

-Capacidad de cambio catiónico. Valor T: saturación del complejo absorbente con un catión mediante una solución de acetato de calcio(1 mol/L), del cual se obtuvo un filtrado II, el que se valoró una alícuota de 25 ml con una solución de EDTA a 0.01 mol/L.

-Capacidad de cambio de bases. Valor S: mediante la suma de las bases cambiables.

$$S = Ca^{2+} + Mg^{2+} + K^{+} + Na^{+} \quad \text{en c.mol (+). Kg}^{-1}$$

-Relaciones intercatiónicas estudiadas: Ca^{++}/Mg^{++} , K^{+}/Ca^{++} , K^{+}/Mg^{++} . Por cálculo.

El trabajo incluye un estudio de las propiedades físicas del suelo, para lo cual se utilizaron métodos clásicos o tradicionales; aplicándose también el enfoque agrofísico basado en el método termodinámico. Enfoque energético de las propiedades del suelo que definen su estado físico (Cabrera, 1999). Los índices evaluados y las metodologías utilizadas fueron las siguientes:

-Composición granulométrica y de microagregados: con ayuda de la pipeta de Robinson, utilizando pirofosfato de sodio como dispersante; ambos según Kachinski, citado por Vadiunina y Korcháguina (1986).

A partir de los datos de granulometría y de microagregados se determinó el coeficiente de dispersión (Kd) según (Vadiunina y Korchaguina, 1986):

$$Kd = A/B * 100$$

Donde:

A, contenido de partículas < 0.001 mm del análisis de microagregados y B, fracción similar del análisis granulométrico.

-Composición de macroagregados: Método de Sávinov, según Kaúrichev (1984) y Vadiunina y Korcháguina (1986).

De los resultados de este análisis se evalúa el coeficiente de estructura (K_e).

$$K_e = c/g$$

Donde:

c, es el contenido de agregados de diámetro comprendido entre 10 y 0.25 mm y g, los agregados de diámetro $>10 \text{ mm} < 0.25 \text{ mm}$.

-Estabilidad estructural: tamizado en húmedo, resultando el % de agregados estables al agua (A_e) $> 0.25 \text{ mm}$.

-Densidad del suelo o aparente (ρ): método de los cilindros de Klimes, según Vadiunina y Korchaguina (1986).

-Densidad de la fase sólida del suelo o real (γ): método del picnómetro (Kaúrichev, 1984).

-Capacidad de campo o humedad máxima asimilable (W_{cc}): Por Kaúrichev (1984).

-Velocidad de infiltración: se obtienen las curvas de infiltración mediante el método de los anillos concéntricos; con humedad inicial del suelo correspondiente al límite productivo.

-Humedad de marchitez (W_m): mediante cálculo a partir de la humedad higroscópica máxima (W_y) y utilizando el factor $f = 1.34$ (Vadiunina y Korcháguina, 1986).

-Porosidad total o volumen total de poros (V_t): (Biriozin y Shein, 1988), a través de la ecuación:

$$V_t = \left(1 - \frac{\rho}{\gamma}\right) \cdot 100$$

-Porosidad de aireación (V_a): cálculo a partir de la porosidad total y la humedad de capacidad de campo:

$$V_a = V_t - \rho W_{cc}$$

-Límite superior de plasticidad o límite líquido (W_{ll}): Método de Vasiliev (Kaúrichev, 1984).

-Límite inferior de plasticidad o límite plástico (W_{lp}): Según Atterberg, (citado por Kaúrichev, 1984).

-Índice de plasticidad (IP): cálculo a partir de W_{ll} y W_{lp} .

-Tratamiento energético de las propiedades físicas del suelo: el enfoque termodinámico incluye el estudio del estado energético de la humedad del suelo mediante la obtención y análisis de las características hidrofísicas fundamentales que constituyen la base para los Diagramas del Estado Físico del Suelo. Para la obtención de las Características Hidrofísicas Fundamentales (CHF) y su interpretación, se aplicó la metodología propuesta por Voronin (1984, 1990).

En las CHF se establecen, en cada caso los potenciales críticos y los parámetros hidrológicos relacionados con ellos, las distintas formas de agua en el suelo y su comportamiento físico-mecánico en los distintos rangos de humedad a partir de las ecuaciones propuestas por Voronin (1990):

- Estado crítico I: $\lg |P^I_m| = 4.2 + 3W$
- Estado crítico II: $\lg |P^{II}_m| = 1.17 + 15W$
- Estado crítico III: $\lg |P^{III}_m| = 1.17 + 3W$

- Estado crítico IV: $\lg |P^{IV}_m| = 1.17 + W$
- Estado crítico V: $\lg |P^V_m| = 1.17$

En las expresiones anteriores, P_m es la presión matricial en kPa y W es el contenido de humedad en $g \cdot g^{-1}$.

Aplicando la metodología propuesta por Voronin (1990) se hace la clasificación de las categorías de humedad del suelo y se establecen los límites de humedad vinculados a su comportamiento mecánico.

3.4.3. Evaluaciones realizadas a la planta.

-Los componentes del rendimiento: Altura hasta el Dewlap +1 (cinta métrica); diámetro de los tallos, en el entrenudo +7 (con un pie de rey), masa de los tallos se determinó con ayuda del dinamómetro y número de tallos por metro lineal (por conteo). Se tomaron posteriormente muestras para el análisis de la calidad de los jugos, realizándose las siguientes determinaciones:

-Brix, Pol y Pureza.

-El Pol en caña se determinó a partir de los valores de Pol en jugo, Brix y % de humedad (Paneque et al., 1989).

-El rendimiento en toneladas de caña/ hectáreas por variante durante el periodo evaluado se determinó a partir del peso total de los tallos existentes en cada parcela.

3.5.Métodos estadísticos empleados.

A las propiedades químicas, físico-químicas y físicas del suelo, así como al rendimiento, sus componentes y calidad de los jugos de la caña de azúcar, se les realizó un análisis de varianza de clasificación doble con el objetivo de definir su significación. En los casos en que se encontró diferencia significativa entre sus medias, se les aplicó la prueba de rango múltiple de Duncan.

Con el objetivo de determinar la posible relación entre algunas propiedades del suelo y el rendimiento del cultivo, se realizó un Análisis de Componentes Principales para las diluciones de vinaza, en el que se analiza el efecto acumulativo y residual en la variante 1/5, con la correspondiente Regresión Lineal Múltiple, la que permitió obtener las funciones analíticas que relacionan las magnitudes mencionadas.

Todos estos análisis se realizaron con ayuda del paquete estadístico SPSS 8.0, soportado sobre el sistema operativo Windows.

3.6.Evaluación económica de los resultados.

Con la finalidad de realizar una valoración económica sobre la utilización de este residuo para inducir cambios en las propiedades de los Vertisoles, se analizan y comparan los rendimientos entre algunas variantes y sus posibles ganancias, sobre la base del valor actual de la producción de caña, así como por concepto de no utilizar fertilizantes minerales durante el periodo evaluado.

Los indicadores que se tuvieron en cuenta para evaluar la efectividad económica de las aplicaciones fueron: Producción total (producción agrícola o rendimiento); costos de la producción (costos de la producción agrícola cañera y costo de la fertilización); valor de la producción; costo por peso producido; ganancia o beneficio y como indicador que mide la eficiencia económica se determinó la rentabilidad.

En el trabajo se tiene en cuenta además, los efectos económicos indirectos producidos por concepto de incremento de los rendimientos del cultivo y la incidencia que sobre ellos ejercen las aplicaciones de vinaza a largo plazo, así como lo que ello significa en la protección del recurso suelo. Se presenta también, una valoración sobre las posibles áreas a beneficiar en dicho complejo a partir de los volúmenes de residuos producidos.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

4.1. Caracterización química del residuo de producción de alcohol (vinaza) procedente de la destilería "Nauyú" y de su mezcla con el residuo de producción de azúcar crudo del CAI "Enrique Varona González". Calidad agronómica de estas aguas.

La diversidad de origen y composición de estas aguas, así como los efectos que producen sobre el suelo y el cultivo de la caña de azúcar, hacen necesario la ordenación de conocimientos teóricos y prácticos acumulados a lo largo de estos años de investigación, con el objetivo de fijar, sobre esta base los criterios que nos permitan establecer a priori su calidad. Los métodos más utilizados a escala mundial, que son los que más nos pueden ayudar a formar un criterio acertado, no consideran las relaciones que se establecen entre éstas y el medio en que serán consumidas. Con el fin de evitar un diagnóstico erróneo es necesario entonces, considerar algunos aspectos referentes a la calificación de estos efluentes que consideramos de vital importancia, si tenemos en cuenta que las características de estas aguas a criterio de Otero et al.,(1998) por sus propiedades físicas y composición química puede ser extremadamente variable atendiendo a su origen, además del tipo de proceso de tratamiento que en ella se siga. Esto causa que en la misma planta de tratamiento, su composición pueda no ser uniforme en el tiempo, por lo que es difícil presentar datos de composición representativos.

Aunque la acidez (pH), generalmente no es un índice demasiado importante en la calificación del agua para riego si esta fuera clara o freática, al tratarse de aguas residuales, este indicador adquiere una importancia trascendental. Se considera normal un agua cuyos valores de pH oscilen entre 7 y 8, fuera de este rango se provocan afectaciones al cultivo tales como: clorosis, intensa defoliación y cambios notorios en las propiedades químicas, físicas y biológicas de los suelos. Según los resultados que se brindan en la caracterización (Tablas N°1,2), estos efluentes presentan valores de pH entre 4.61 y 5.08, los que se consideran como ácidos y medianamente ácidos respectivamente, no siendo aptos para el riego de áreas agrícolas si se consideraran únicamente como agua freática. Sin embargo, el criterio de utilizar estos residuos en la concepción de agua para riego con materia orgánica disuelta o como enmienda orgánica en los suelos, los convierte en una inestimable fuente de agua, materia orgánica y nutrientes para el cultivo de la caña de azúcar, siempre y cuando las dosis y el manejo del residuo garanticen su correcta recepción, movimiento y evacuación del perfil.

Los valores de conductividad eléctrica a 25°C son altos para el residuo de producción de alcohol 9.90 ms/cm, no así para la mezcla de este con el residuo de producción de azúcar la que presenta valores bajos (2.22 ms/cm). Esto nos indica que el residuo puro no es posible utilizarlo directamente como agua para riego, mientras que la mezcla vinaza y crudo se encuentra en el rango permisible (< 2.5 ms/cm) en cuanto a este indicador. De manera similar ocurre con las sales solubles totales, de la que se reportan valores de 6.33 y 1.42 g/l respectivamente, los que son altos para la vinaza pura, no así para el caso del residuo de producción de azúcar crudo y alcohol, donde los riesgos de utilización son significativamente menores.

El análisis de los iones presentes, indica para el caso de los cationes calcio, magnesio, potasio y sodio y los aniones cloruro, carbonato y bicarbonato un comportamiento muy variable en la concentración de cada uno de ellos.

Es conocida la importancia que el calcio desempeña en las propiedades de los suelos y sus funciones específicas en el metabolismo de las plantas. Los valores que presentan ambos efluentes, (3.32g de calcio/L para el residuo de destilería y 0.54 g de calcio/L para la mezcla de vinaza y crudo), representan una vía importante de aporte de este elemento al suelo, lo cual influye en sus propiedades físicas y químicas.

Un análisis de los contenidos de potasio, nos permite afirmar que sus niveles no son nada despreciables desde el punto de vista del aporte de nutrientes que pueden realizar al suelo. Para el caso del residuo de producción de alcohol, se presentan valores de 7.85 g/l, los que son superiores a la mezcla de vinaza con el residuo de producción de azúcar crudo (0.29 g/l). Un análisis de su valor fertilizante nos demuestra, que se puede llegar a incorporar con dosis de 250 m³/ha puro, cantidades de potasio de hasta 1 962 Kg . ha⁻¹, lo que resulta de inestimable valor.

Al evaluar los contenidos de sodio como uno de los iones responsables de toxicidades específicas en los cultivos, así como por el efecto degradante que sobre el estado físico de los suelos provoca, los valores en ambos efluentes son de 0.3 y 0.05 g/L respectivamente. Se consideran en ambos casos dentro de los rangos permisibles, por lo que no constituye este índice una limitante para la utilización de estos residuos.

Los resultados de las caracterizaciones nos permite considerar que estos efluentes son de gran valor al ser utilizados como fuente de nutrientes y materia orgánica disuelta, lo que contribuye a suplir la mayoría de las necesidades nutricionales para el cultivo de la caña de azúcar,

mejorar las propiedades de los suelos con problemas de degradación y evitar daños a los ecosistemas a través de su aprovechamiento.

4.2. Influencia del residuo de destilería en las variantes puro (como enmienda orgánica), y diluido (como agua para riego) sobre las propiedades del suelo en el nivel jerárquico de estructuración iónico molecular.

4.2.1. Equilibrio ácido base. Comportamiento del pH en agua y en cloruro de potasio.

El pH del suelo es un importante indicador que se relaciona de manera directa con la nutrición de los cultivos y con la variación de la concentración de nutrientes.

Cuando se aplicó la vinaza pura el equilibrio ácido base del suelo no se afectó a pesar de su fuerte acidez. No existen en este indicador diferencias significativas entre los tratamientos en los años y las profundidades evaluadas (Tablas N°3,4, 5).

Resultados similares se encuentran cuando se aplican diluciones de vinaza en agua (Tablas N°6,7,8).

En estos suelos producto de la Sialitización compacto-plástica (Vertisolización), es característico un alto contenido de arcillas del tipo 2:1 (fundamentalmente montmorillonita), la que incide en su capacidad de absorción, a la vez que su saturación por bases en el complejo de cambio es elevada, condiciones que contribuyen a contrarrestar los efectos acidificantes que los residuos pueden producir.

La estabilidad mostrada por este parámetro posibilita emplear la vinaza en sus diferentes alternativas de manejo, aprovechando así la alta capacidad amortiguadora que estos Vertisoles presentan.

Algunos autores como Paneque et al.,(1987) al aplicar residuos de destilerías y evaluar sus efectos sobre las propiedades químicas de diferentes suelos, dentro de los que se incluyen los Vertisoles, no encontraron cambios significativos sobre la acidez de los mismos.

4.2.2. Materia Orgánica.

La materia orgánica desempeña un importante papel en el mejoramiento del estado físico de los suelos al favorecer la velocidad de infiltración del agua, disminuir la densidad del suelo y favorecer la formación de agregados agrónomicamente más valiosos (Lorenzo, 1998a).

Las modificaciones producidas en los contenidos de materia orgánica por la aplicación de vinaza pura en caña planta, primer retoño y el efecto residual en la quinta cosecha se presenta en las Tablas N°3,4 y 5.

Los mayores contenidos en caña planta (Tabla N°3) se alcanzan en los tratamientos de 200 y 250 m³.ha⁻¹ en la profundidad de 0.00-0.20m, con valores de hasta 3.61%. Sin embargo, en el efecto residual la variante de 100 m³. ha⁻¹ muestra valores de 3.87%, el que difiere de los restantes tratamientos. Se demuestra así, que durante el transcurso del tiempo en esa variante, ocurrió una mejor humificación de la materia orgánica disuelta aportada por la vinaza. Las modificaciones inducidas en esta propiedad contribuyen a criterio de Solórzano (1998) al aumento de la fertilidad de estos suelos.

La aplicación de diluciones de vinaza en agua por su parte, logra incrementos efectivos en la materia orgánica, donde las variantes 1/5 y 1/10 en el primer año mostraron los incrementos más significativos (Tabla N°6). Durante el efecto acumulativo (Tabla N°7) se obtienen valores aún superiores. Los contenidos en el efecto residual en la quinta cosecha (Tabla N°8) experimentan ciertas disminuciones, lo que se explica por la suspensión de las aplicaciones durante tres años.

El efecto acumulativo y residual para la materia orgánica es marcado al aplicar la vinaza en la alternativa de dilución, destacándose en sentido la variante 1/5.

Teniendo en cuenta que estos residuos se presentan en forma líquida, a diferencia de otros mejoradores, se logran incrementos de los contenidos de materia orgánica en todas las variantes de ambas alternativas en la profundidad de 0.20-0.40m. Esto permitió el enriquecimiento del suelo en esta parte del perfil.

El residuo de destilería, es por tanto, una fuente apropiada de materia orgánica al suelo, constituyendo a la vez una excelente vía para restablecer el deterioro a que están sometidos, y contribuir a contrarrestar las principales causas que atentan contra la obtención de altos rendimientos. Ha sido demostrado, como expresan Montero et al., (2001) que el cultivo continuado de la caña de azúcar produce cambios importantes en las características químicas de los Vertisoles, los que se refleja principalmente en las disminuciones de los contenidos de materia orgánica.

Resultados similares reportan, Arzola (1988) y Cairo (1994) al utilizar residuos orgánicos como el de producción de levadura torula y cachaza en suelos Ferralíticos y Oscuros plásticos, respectivamente.

4.2.3. Fósforo asimilable.

Las modificaciones que sobre los contenidos de fósforo asimilable produce la vinaza pura en caña planta, como un elemento indispensable en la fertilización balanceada en el cultivo de la caña de azúcar, se muestra en la Tabla N°3. En el mencionado cuadro se presentan incrementos significativos en sus contenidos para todos los casos donde se produjo estas aplicaciones. Los niveles más elevados se alcanzan en esta cepa para el tratamiento de 250 m³ de vinaza/ ha, el que difirió de los restantes. Los incrementos producidos por las aplicaciones se consideran importantes, si tenemos en cuenta lo expresado por la mayoría de las investigaciones desarrolladas con abonos orgánicos, en las que se indica que aproximadamente del 60-80% del fósforo puede estar a disposición de los cultivos durante el primer año de su aplicación (Rehm et al.,1999).

En el primer retoño (Tabla N°4), se aprecia que sus contenidos continúan elevados en los tratamientos enmendados con respecto al testigo.

Los valores de fósforo alcanzados para las variantes bajo efecto del residuo puro en la quinta cosecha (Tabla N°5), son superiores al testigo y a la fertilización mineral, lo que denota el carácter residual de las aportaciones.

Se considera por tanto, esta alternativa como una fuente importante para aportar fósforo a estos suelos.

El fósforo se encuentran generalmente en forma orgánica en estos residuos, se puede plantear entonces, que el incremento producido, se debió a una adecuada mineralización de la materia orgánica contenida en ellos, la que liberó este elemento en formas asimilables. De esta forma, los niveles óptimos se mantienen por un periodo de tiempo más prolongado, lo que es

suficiente para garantizar su demanda en las diferentes fases del cultivo. La característica de estos suelos al poseer un elevado contenido de arcilla y por tanto una gran superficie específica, hace que se absorba gran cantidad de fósforo en ellos (García, 1999).

En el caso de las aplicaciones de vinaza diluida (Tablas N° 6,7,8), el comportamiento de los contenidos de fósforo asimilable fue similar a los tratamientos que recibieron aplicaciones puras, se destaca en este sentido la variante 1/5 como la de mejores resultados para el periodo evaluado. Se logra en ella un efecto acumulativo y residual marcado.

Lo más relevante en estos resultados, son los incrementos que se logran en la profundidad de 0.20-0.40 m, lo cual es trascendente si tenemos en cuenta la limitada movilidad de este elemento en el suelo y las características de drenaje desfavorable que presentan los Vertisoles. Los valores muestran diferencias significativas en todas las variantes con respecto al control, siendo notables los resultados que existen entre el suelo tratado y la fertilización mineral. Este comportamiento se atribuye al mejoramiento del estado físico del suelo, expresado a partir de las magnitudes que definen el movimiento del agua en suelo.

Las aplicaciones de estos residuos a Vertisoles en las diferentes alternativas de utilización modificaron los contenidos de fósforo en estos suelos, lo que se corrobora también por resultados obtenidos por Anana (1998), quien al aplicar vinaza a un suelo Ferralítico, encontró incrementos en el fósforo total, permitiéndole considerar que la vinaza independientemente de su efecto contaminante del medio ambiente, puede ser utilizada como fertilizante en los cultivos. De manera similar concluyen Paneque et al., (1987) al utilizar aguas residuales de los procesos de crudo, refinería y destilería como fuente de riego y fertilización para la caña de azúcar en las condiciones del CAI “ Arquímedes Colina”, en Cuba.

Los aportes de fósforo realizados por ambas alternativas de manejo de la vinaza permitió prescindir de la fertilización mineral de la caña de azúcar con este elemento en el periodo evaluado.

4.2.4. Potasio asimilable. Potasio intercambiable.

Debido a las altas extracciones de potasio que realiza el cultivo de la caña de azúcar, la fertilización o aporte de este elemento al suelo es uno de los aspectos más importantes a tener en cuenta para la obtención de altos rendimientos agrícolas con buena calidad.

Como se refiere en las tablas N° 3,4 y 5, las aplicaciones de vinaza pura, incrementaron de manera significativa los contenidos de potasio asimilable e intercambiable, los cuales fueron crecientes a las dosis empleadas. Las variantes donde se consigue incrementar en mayor medida los contenidos este nutriente corresponden a 100 y 150 m³.ha⁻¹

La fertilización mineral en estas condiciones produjo incrementos de los contenidos de este elemento similares a las producidas por los residuos.

La dilución vinaza-agua 1/5 es la que realiza mayores aportes de potasio asimilable e intercambiable del suelo en el efecto acumulativo (Tabla N°7). Una característica del residuo son sus altos niveles de dicho elemento, lo que explica en cierta medida este comportamiento.

Arzola et al., (1988) y Gómez (2000) coinciden en afirmar que los residuos industriales de azucarería fundamentalmente torula y vinaza son capaces de garantizar la cantidad de potasio que requiere la caña de azúcar para obtener altos rendimientos.

Un aspecto importante a destacar es que en la profundidad de 0.20-0.40 m, los tratamientos bajo efecto de los residuos, manifiestan valores de potasio asimilables e intercambiable superiores al testigo y a la fertilización mineral.

Con la utilización del residuo en las diferentes formas de manejo se lograron incrementos de potasio, que permitió prescindir de la fertilización mineral durante el periodo evaluado. Por ejemplo, las cantidades de potasio aportadas para dosis de vinaza pura de 50 y 250 m³.ha⁻¹, son de 392.5 y 1 962 Kg .ha⁻¹, respectivamente. Ello demuestra, las potencialidades de estos efluentes como fuente de potasio para los suelos al cubrir prácticamente la totalidad de las necesidades teóricas de este nutriente para el cultivo.

4.2.5. Cationes Cambiables.

El comportamiento de los cationes del complejo de cambio, así como su dinámica, en los experimentos donde se utilizó la vinaza pura o diluida, se presenta como una característica físico-química de los suelos de gran importancia.

Los incrementos logrados por las aplicaciones de vinaza pura, denotan el efecto marcado que ejercen esta alternativa como fuente de calcio para estos suelos, al elevarse sus contenidos con las dosis en caña planta (Tabla N°9) y mantenerse estos contenidos no sólo en el primer retoño (Tabla N°10), sino en el efecto residual en la quinta cosecha (Tabla N°11).

En la profundidad de 0.20-0.40 m se ven favorecidos sus contenidos, con diferencias significativas entre los tratamientos bajo los efectos del residuo con respecto al control.

La vinaza pura como enmienda orgánica es capaz de modificar los contenidos de este elemento en el suelo.

Los contenidos de magnesio para las aplicaciones del residuo puro disminuyeron notablemente, lo que se atribuye en parte a la movilidad característica de este ión, así como los incrementos en los contenidos de potasio, lo que incidió en la disminución del este elemento a causa del antagonismo que se presenta entre ellos.

Arzola (1988), al referirse a los efectos que ejercen sobre el suelo los residuales de azucarería, señala que los mismos se producen fundamentalmente sobre las bases cambiables del suelo, debido a que los altos contenidos de potasio intercambiable tiende a disminuir los de magnesio.

En las diluciones de vinaza (Tablas N°12,13,14), se presentó también una disminución de los contenidos de magnesio, los cuales fueron mayores en el efecto acumulativo, momento para el cual se alcanzan los mayores valores de potasio en el suelo.

Algunos investigadores consideran que la limitante fundamental de estos residuos para su uso agrícola son los altos contenidos de sales que presentan. Sin embargo, se aborda poco sobre el efecto que ejerce el potasio sobre el sodio intercambiable. Cuando se realizaron aplicaciones de vinaza pura y diluida, se produce una disminución en los contenidos de sodio intercambiable, efecto que perdura hasta la quinta cosecha. Esto permite afirmar que dichos residuos son una vía apropiada para contrarrestar los niveles sodio intercambiable presente en el suelo.

Un aspecto importante a destacar es que fertilización mineral no contribuyó a disminuir los contenidos de este elemento.

4.2.6. Comportamiento de las relaciones intercati3nicas estudiadas. Relaci3n calcio-magnesio ($\text{Ca}^{++}/\text{Mg}^{++}$), potasio-calcio ($\text{K}^{+}/\text{Ca}^{++}$) y potasio-magnesio ($\text{K}^{+}/\text{Mg}^{++}$).

Aunque entre los iones calcio y magnesio el antagonismo no es tan marcado, se conoce que para el mejor desarrollo de las plantas debe existir cierta proporci3n entre cada uno de ellos.

Las aplicaciones del residuo en las dosis y alternativas utilizadas favorecieron la relaci3n $\text{Ca}^{++}/\text{Mg}^{++}$. Se encontr3 una relaci3n aproximada entre 2:1 y 6:1 en la primera profundidad, lo que fundamenta partir del mejor balance logrado para estos elementos. (Tablas N3 6,7,8).

Para la profundidad de 0.20-0.40 m, esta relaci3n pasa de inadecuada en el suelo no tratado a una relaci3n adecuada para el suelo bajo los efectos de la vinaza tanto pura como diluida. Se destaca en este sentido, las variantes de 100 y 150 $\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ de vinaza pura y la diluci3n 1/5, tanto en el efecto acumulativo de las diluciones como durante el efecto residual de ambas alternativas.

En las relaciones potasio-calcio y potasio-magnesio no se encontraron diferencias significativas entre el control y las restantes variantes tanto en la vinaza pura como en las diluciones. Esto indica, que a pesar de producirse incrementos en los contenidos de potasio asimilable e intercambiable, 3ste no ejerci3 un efecto marcado sobre las variaciones de los contenidos de calcio y magnesio del suelo, a pesar de que el antagonismo entre el potasio y el magnesio es marcado. Los valores obtenidos se encuentran dentro de los rangos permisibles para cada una de ellas.

Al referirse a la importancia de las relaciones intercati3nicas en suelos bajo uso y manejo de residuos, Arzola (1985) se3ala que uno de los efectos m3s sobresalientes lo constituyen las afectaciones que sobre las relaciones $\text{K}^{+}/\text{Ca}^{++}$ y $\text{K}^{+}/\text{Mg}^{++}$ pueden producirse, las que

constituyen un indicador importante para decidir el tiempo durante el cual se pueden aplicar estos residuos, ya que el magnesio a causa de su movilidad en el suelo puede ser lavado fácilmente.

Los resultados que se exponen al respecto nos permiten considerar, que las aplicaciones tanto de vinaza pura como en dilución en las dosis propuestas son una alternativa para mejorar estos índices.

4.2.7. Capacidad de Cambio de Bases (Valor S) y Capacidad de Cambio Catiónico (Valor T).

La capacidad de cambio de bases y de cationes, como propiedades físico química importantes para los Vertisoles, se favoreció en ambas profundidades para todos los tratamientos que recibieron la vinaza pura, tal y como se aprecia en las Tablas N° 9,10,11. Los valores alcanzados se corresponden con el incremento de los cationes calcio y potasio, los que al ser marcados contrarrestaron la disminución de los contenidos de magnesio y sodio. Se logra así, el mejoramiento de estas propiedades.

Estos índices difieren significativamente en el testigo con respecto a las variantes tratadas en caña planta; permaneciendo esta diferenciación en el efecto residual en la quinta cosecha.

En las diluciones de vinaza (Tablas 12,13 14), se produce un incremento significativo en la capacidad de cambio catiónica del suelo (CCC), el que es más importante en la variante 1/5 en el efecto acumulativo. Durante el efecto residual siempre se obtienen valores superiores al testigo en esta variante.

En estos suelos es característico una alta CCC, no obstante el residuo contribuyó a modificar en el orden positivo aún más esta propiedad.

La trascendencia del incremento alcanzado en estos indicadores es un reflejo directo del mejoramiento químico que experimentan los Vertisoles al ser sometidos a la aplicación de estos residuos, lo que eleva su fertilidad y capacidad productiva. Aspectos que corroboran resultados presentados por (Paneque et al., 1987, 1989 y Arzola 1996).

4.3. Modificaciones del residuo de destilería en las propiedades de los Vertisoles a nivel de partículas elementales.

4.3.1. Composición granulométrica y de microagregados.

La fracción < 0.01mm muestra valores superiores al 70 % en todo el perfil, por lo cual este suelo se clasifica como arcilloso y es característico para la mayoría de los Vertisoles en el mundo (CIID, 1998).

Las aplicaciones de vinaza en las alternativas propuestas, vinaza pura (Tablas N°15,16,17) y vinaza diluida (Tablas N°18,19,20), no modificaron la composición granulométrica del suelo. Autores como Lorenzo (1998) y Cabrera (2000) reportan que al emplear diferentes residuos industriales de azucarería en suelos arcillosos y de diferente composición química y mineralógica, los mismos no provocaron alteraciones en la granulometría. Resultados que indican, que esta es una característica poco dinámica, la cual no puede ser variada fácilmente por la acción de agentes externos.

Por otra parte, de acuerdo a Kovda y Rozanov (1990), la composición mecánica de los suelos se hereda de la roca madre y por tanto varía muy poco durante el proceso de formación del suelo.

En los Vertisoles es característico una alta capacidad de dispersión, lo que se explica por su bajo contenido de materia orgánica, alto contenido de magnesio y la presencia de sodio. El magnesio según Orellana et al., 1997 crea una alta capacidad de hidratación que dificulta la floculación de los agregados e impide la fácil entrada de nutrientes.

El estado de la microestructura en la alternativa de vinaza pura en caña planta se modifica, y de manera más elocuente en la variante de 150 m³/ha, donde el coeficiente de dispersión decrece hasta el valor de 36.69% con respecto a 48.14% en el control (Fig. N°1).

Las evaluaciones del efecto residual se presentan al finalizar la segunda y quinta cosecha (Tablas N°16,17). A los cinco de haber aplicado el residuo puro, se aprecia que la suspensión de dichas aplicaciones provocaron un deterioro del estado de la microestructura, perdurando en cierta magnitud el mencionado efecto en este periodo (Le Bissonnais et al.,1996 ; Scholten et al., 1998).

El estado de la microestructura para las diluciones en las distintas variantes se favorece en el primer año, lo cual se puede constatar a partir del análisis del comportamiento de las partículas más finas ($p < 0.001$ mm). Por ejemplo, en el tratamiento control su contenido es de 30.10 % en la capa superficial, mientras que en la variante (1/5), se reduce a 24.50 %; lo que resulta que el coeficiente de dispersión (K_d) decrezca de 47.69 % a 38.80 % en estas condiciones (Fig. N°2). Un comportamiento similar se manifiesta para la segunda profundidad.

Los cambios en este índice reflejan una mayor estabilidad de la microestructura del suelo al aplicarse la dilución 1:5, mientras que la variante 1:2.5, no ejerció efectos significativos sobre la misma, lo que se refleja en su coeficiente de dispersión.

El estado de la microestructura no es el mismo en cada tratamiento durante el efecto acumulativo (Tabla N°19). En la variante 1/5 el contenido de partículas < 0.001 mm se redujo de 24.50 % en el 1^{er} año a 22.51 % durante el efecto acumulativo, con igual tendencia para la segunda profundidad, ello repercutió en un decrecimiento del coeficiente de dispersión en estas condiciones, lo cual puede ser atribuido al aumento del contenido de compuestos orgánicos (Gallardo, 1994; Arrouays, 1994; Arrouays y Pelissier, 1994; Gregorich et al., 1996; Scholten, 1997).

En el efecto residual en la quinta cosecha (Tabla N°20) se presenta una diferenciación en el comportamiento de cada variante, al compararse con los dos primeros años. Al analizar la variante de mejor comportamiento en cuanto a la microestructura (1/5), notamos en el análisis de microagregados que el contenido de partículas < 0.001 mm ha crecido de 22.51 % en el 2° año (efecto acumulativo) a 26.27 % en el 5° año (efecto residual) en la capa superficial, lo que ocurre de manera similar en la profundidad de 0.20-0.40 m. Esto significa una mayor dispersión, alcanzando el coeficiente de dispersión un valor 41.41 % en estas condiciones.

La suspensión de las aplicaciones durante 3 años y la incidencia que en ello tuvo la disminución de los contenidos de materia orgánica, conllevó a mantener en cierta medida la modificación lograda, con tendencia al retorno el suelo en el tiempo a su estado inicial de microestructuración.

4.3.2. Modificaciones del residuo de destilería sobre las propiedades del suelo a nivel de agregados. Composición de macroagregados y estabilidad estructural.

Los resultados del análisis de la composición de la macroestructura (tamiz seco) y de la estabilidad estructural (tamiz húmedo) para las aplicaciones de vinaza como enmienda orgánica y agua para riego, se presentan en las Tablas N° 21 y 24 para caña planta. El efecto acumulativo para las diluciones en la Tabla N°25. El efecto residual en la primera cosecha para la vinaza pura en la Tabla N°22, y en la quinta cosecha para ambas alternativas en las Tablas N°23 y 26. Se presentan también los indicadores denominados coeficiente de estructura (Ke) y % de agregados estables al agua (Ae).

En cuanto al análisis en "seco" se comprueba que en los tratamientos donde se aplicó vinaza tanto pura como diluida se consiguió modificar el estado estructural del suelo durante el 1^{er} año. Las mejores condiciones estructurales se presentan en los tratamientos de 100 m³ .ha⁻¹ de vinaza pura y en las diluciones 1/5 y 1/10, en los que se incrementó el % de agregados agronómicamente más valiosos ($10 > d > 0.25$ mm) .

Para la vinaza pura en la dosis mencionada, este indicador se incrementó hasta 86.96%; lo que trajo consigo que el coeficiente de estructura (Ke) alcanzara el valor de 6.67 en la capa superficial. Lo cual puede explicarse, por los incrementos de los contenidos de materia orgánica reportados para este tratamiento.

El efecto residual con respecto al mejoramiento de la macroestructura es significativo hasta la quinta cosecha.

En la composición de la macroestructura durante el 2° año para las diluciones de vinaza (Tabla N°25), se aprecia un aumento del coeficiente de estructura (Ke) con relación a caña planta,

especialmente en las variantes 1/5 y 1/10, en las que se alcanzan valores de 6.72 y 5.26 respectivamente; con diferencias significativas de los restantes tratamientos.

Los resultados obtenidos en el 5° año de evaluación (efecto residual de las diluciones; Tabla N° 26), muestran una disminución del porcentaje de agregados agronómicamente más valiosos en todos los tratamientos, lo que es consecuencia del deterioro experimentado por la composición estructural. No obstante, las modificaciones encontradas aún persisten.

Lo discutido con anterioridad nos permite aseverar que el manejo de vinaza en las alternativas propuestas modifica la composición macroestructural del suelo de forma positiva. Resultados similares al respecto reportan (Crowford et al., 1998; Filgueira et al., 1998; Cabrera et al., 1999).

Una de las modificaciones más importantes inducidas por la vinaza tanto en las alternativas pura como diluida es en la estabilidad de la estructura. El incremento de los agregados estables al agua es notable sobre todo en las variantes de 150 m³/ha y la dilución 1/5.

En los Vertisoles el agua penetra con dificultad durante el humedecimiento, de manera tal que se crean espacios con aire encerrado que favorecen la desintegración de los agregados, presentándose la estabilidad estructural de estos suelos como uno de los principales factores que limitan su uso y manejo.

En la estabilidad de la estructura los complejos órgano minerales juegan el papel fundamental (Christensen, 1995; Jastrow et al., 1996; Balesdent y Baladane, 1996). Según Haynes y Swift (1990) en los suelos con bajos contenidos de materia orgánica los enlaces que mantienen unidos las partículas que conforman los agregados son relativamente débiles. Durante el contacto con el agua y debido a la rápida hidratación de la superficie de las partículas tiene

lugar una pronta liberación de energía que provoca el rompimiento de muchos de estos enlaces.

Cairo et al., (1994), reportan decrementos significativos en el nivel de dispersión en un Vertisol del norte de Villa Clara bajo el efecto de diferentes residuos orgánicos entre ellos la cachaza en dosis de 50 y 100 t.ha⁻¹.

La vinaza se distingue como un residuo rico en materia orgánica disuelta, donde una de las principales modificaciones que provoca sobre los suelos es en sus contenidos de materia orgánica, tal como se abordó anteriormente. Consideramos que esta es la causa fundamental de las modificaciones inducidas en esta importante propiedad del suelo, la estabilidad de la estructura.

Los resultados demuestran la correspondencia que existe entre el nivel óptimo de agregación del suelo y por tanto de la estabilidad macroestructural con el mejor estado de la microestructura. Con respecto a esto Cabrera (1998), señala que estabilidad de la estructura depende del nivel de microestructuración de las partículas elementales que conforman los agregados primarios del suelo, correlacionándose directamente dicha estabilidad con el grado de microagregación de estas partículas.

El efecto floculante que ejercen los compuestos orgánicos presente en los residuos, permite que los agentes de ligazón logren enlaces más estables y por tanto aumente su resistencia (Cepero y Hernández, 1991).

La estabilidad de los agregados depende en alto grado del contenido y composición en el suelo de la materia orgánica y de los cationes en el complejo absorbente (Lorenzo, 1992; Narro, 1994; Cabrera, 1998). Se establece entre el calcio y otros cationes enlaces de gran fuerza y

estabilidad con la fracción mineral del suelo, lo que permite la formación de agregados de alta resistencia a la acción hídrica y otras fuerzas destructivas.

Kapinos (1990), por su parte reporta incrementos en el contenido de agregados estables al agua y su distribución más uniforme a través del perfil de un suelo podsólico de la región central de Rusia, donde se combinaron enmiendas orgánicas con labores profundas, constituyendo los agentes de ligazón de naturaleza orgánica un importante papel en la formación de una estructura estable (Beare et al., 1994; Golchin et al., 1995).

Cada cambio en la estabilidad de los agregados está supeditado a cambios en el nivel y efectividad de los agentes de agregación que tienen carácter orgánico y representan sólo una fracción del contenido total de materia orgánica del suelo (Tisdall y Oades, 1982; Desjardin et al., 1994).

4.3.3. Modificaciones relacionadas con los índices físicos de la fase sólida y las propiedades estructuro-funcionales.

Las modificaciones provocadas por el residuo de destilería puro en los índices físicos relacionados con la fase sólida, así como sobre algunas propiedades estructuro-funcionales se muestran en las Tablas N°27 y 28.

Como se puede apreciar durante le 1^{er} año (Tabla N°27) la densidad de la fase sólida (γ), sólo experimenta cierta disminución, mientras en la quinta cosecha (Tabla N°28) no se aprecia efecto residual alguno. Esto demuestra que los residuos provocaron modificaciones leves en esta propiedad, la que se caracteriza por ser poco dinámica y depender fundamentalmente de la composición química y mineralógica del suelo.

Con relación al efecto de las diluciones de vinaza sobre la densidad de la fase sólida en el efecto acumulativo, (Tabla N°30) se presentan variaciones similares que cuando se aplicó la vinaza pura, con igual comportamiento en el efecto residual (Tabla N°31).

En trabajos de investigación en los que se emplearon abonos orgánicos como mejoradores del estado estructural de estos suelos, Cabrera (1998) demostró que la materia orgánica no introduce cambios de consideración en la densidad de la fase sólida, al ser ésta una de las características del suelo más estables.

Entre las propiedades funcionalmente ligadas al estado estructural del suelo deben mencionarse aquellas que definen su régimen hidroaéreo y su estado mecánico. Con respecto a ello, puede señalarse que el incremento del contenido de materia orgánica logrado por la aplicación de los residuos en las alternativas utilizadas y su incidencia directa en el estado estructural del suelo, produjo un efecto marcado sobre la densidad aparente del suelo (ρ) y; por ende, en la porosidad total (V_t).

Con la aplicación de la vinaza pura en dosis de $100 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ en caña planta (Tabla N°27), se logró disminuir la densidad del suelo hasta $0.88 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot 10^3$. Se alcanza un resultado similar para esa variante en las partes bajas del perfil, lo que repercute en un aumento del volumen del espacio poroso en la profundidad. Durante el efecto residual en la quinta cosecha se mantiene en cierto grado modificada esta importante propiedad.

Las disminuciones producidas en la densidad del suelo se corresponden con los aumentos significativos de la porosidad total fundamentalmente en esta variante.

La aplicación de vinaza en dilución en la variante 1:5, logra una disminución de la densidad del suelo de $1.03 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot 10^3$ en el control a $0.87 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot 10^3$ en la capa superficial durante el 1^{er} año (Tabla N°29); lo que provocó incrementos de la porosidad total de 61.99 en el control a

66.52 $\text{m}^3.\text{kg}^{-1}.10^{-5}$. Se presenta la misma tendencia para el resto de las profundidades analizadas. Durante el 2º año (Tabla N°30) se logra reducir la densidad aparente hasta 0.80 $\text{kg}.\text{m}^{-3}.10^3$ en la capa superficial de la variante 1/5, donde la porosidad total alcanza el valor de 69.46 $\text{m}^3.\text{kg}^{-1}.10^{-5}$.

Al analizar la quinta cosecha (Tabla N° 31) la tendencia del suelo es hacia la recuperación de su estado inicial. Los valores en la capa superficial (0.00 – 0.20 m), indican un aumento de la densidad aparente hasta 0.96 $\text{kg}.\text{m}^{-3}.10^3$ en la variante 1/5, y la disminución de la porosidad de total hasta 64.44 $\text{m}^3.\text{kg}^{-1}.10^{-5}$.

Al respecto Cairo (1995), reporta disminución de la densidad del suelo de 1.06 a 0.88 g/cm^3 al aplicar dosis de 50 t/ha de abono orgánico a un Vertisol del norte de la provincia de Villa Clara. Resultados similares sobre el efecto de la materia orgánica en la densidad del suelo han reportado (Hassink, 1993; Cairo y Fundora, 1994; Ladd et al.,1994; Schaefer et al., 1997).

Los resultados obtenidos con relación a la densidad del suelo ante la aplicación del residuo de destilería (vinaza) para ambas alternativas aseguran que su utilización en áreas dedicadas al cultivo de la caña de azúcar es efectiva para reducir la compactación a que están sometidos estos suelos generalmente. Los incrementos de los contenidos de materia orgánica y calcio producidos, ejercieron una incidencia directa en el estado estructural del suelo al disminuir la densidad aparente y aumentar la porosidad total (Cavalho et al.,1997; Cabrera 2000).

Una importancia trascendental en el manejo del agua en los vertisoles, lo constituye el estudio de las diferentes categorías de humedad o las denominadas constantes hidrológicas.

Al analizar la humedad a capacidad de campo (W_{cc}) durante el 1º año de aplicación del residuo puro (Tabla N° 27) y diluido (Tabla N°29), se observó que la misma disminuye de 50.03 $\text{m}^3.\text{kg}^{-1}.10^{-5}$ en el control a 43.03 $\text{m}^3.\text{kg}^{-1}.10^{-5}$ en la primera profundidad como

consecuencia de la aplicación de dosis de $150 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ de vinaza pura, y alcanzando el valor de $43.17 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot 10^{-5}$ en la dilución 1/5.

Para las aplicaciones de vinaza en dilución en la capa superficial de la variante 1/5 en el efecto acumulativo (Tabla N°30), la disminución fue hasta $41.00 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot 10^{-5}$ con igual tendencia en la segunda profundidad.

Algunos investigadores han obtenido resultados que no coinciden con los nuestros, entre ellos, Cabrera (1999) y Duquesne (1998), quienes reportan aumentos significativos de la capacidad máxima y de campo al tratar un Vertisol con dosis de 70 y $140 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ de cachaza, encontrando relación directa entre la dosis y estos parámetros. Cairo (1995) no encontró relación alguna entre la capacidad de campo y contenido de materia orgánica, aunque reconoce que esta última permite aumentar los contenidos de agua disponible y disminuir los de la no disponible.

Los resultados en la quinta cosecha (Tablas N° 28 y 31) para las alternativas utilizadas advierten un nuevo incremento del contenido de humedad en capacidad de campo, de lo que se deduce que el suelo empeorara sus condiciones físicas con tendencia a la búsqueda de su estado inicial y al mantenimiento en cierta medida del efecto residual.

Las modificaciones producidas por la vinaza en la concepción de enmienda orgánica o como agua para riego, sobre la capacidad de retención de humedad en la expresión de la capacidad de campo están en correspondencia con los cambios cuantitativos ocurridos en la estructura del suelo. Los cambios producidos en la mejor micro y macroagregación favoreció el aumento del espacio poroso total, provocando que el agua pueda fluir más libremente o almacenarse bajo determinadas condiciones. Se modificó entonces de esta manera, el régimen de humedad del suelo.

La aireación como una propiedad que limita la capacidad productiva de los Vertisoles se modificó en gran medida por las aplicaciones del residuo. En la vinaza pura este indicador en la capa superficial, alcanzó $27.81 \text{ m}^3 \cdot \text{Kg}^{-1} \cdot 10^{-5}$ con $150 \text{ m}^3/\text{ha}$ en caña planta en relación a $9.15 \text{ m}^3 \cdot \text{Kg}^{-1} \cdot 10^{-5}$ en el control. En el efecto acumulativo de las diluciones, toma el valor de $36.65 \text{ m}^3 \cdot \text{Kg}^{-1} \cdot 10^{-5}$ en la variante 1/5 en esta misma profundidad.

En el efecto residual para ambas alternativas persiste en determinado grado esta modificación. Fiago y Rodríguez (1998) refieren que los suelos pesados se caracterizan por poseer mayor porcentaje de micro poros que de macroporos. Es importante destacar entonces, como el residuo contribuyó a modificar la distribución porosa con incremento de los macroporos y disminución de los microporos.

Lorenzo (1998), reporta incrementos en el volumen específico total de poros, y aumentos de la aireación al aplicar diferentes dosis de residuo de producción de levadura torula a un suelo Ferralítico amarillento.

En cuanto a la capacidad de retención de humedad donde el papel fundamental lo juegan las fuerzas superficiales de adsorción de la fase sólida, se observa que en el suelo tratado con el residuo puro y diluido existe una tendencia apreciable al decremento de los valores de la constante hídrica denominada humedad de marchites (W_m). Por ejemplo, en el 1^{er} año durante aplicaciones puras y diluidas (Tabla N°27,29), se encontró diferencias significativas marcadas entre el control y la variante de $150 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ y la dilución 1/5, en la capa superficial.

Al evaluar el efecto acumulativo del residuo de destilería diluido sobre la humedad de marchites (Tabla N°30), se reporta un efecto importante en su disminución con respecto al control en ambas profundidades, sobresale en este sentido la variante 1/5.

Los resultados obtenidos en cuanto a las modificaciones provocadas por el residuo en el denominado punto o estado de marchites, dan lugar a un incremento del agua disponible para las plantas.

En relación con la plasticidad como una propiedad físico mecánica y de gran trascendencia sobre todo en el manejo tecnológico de estos suelos, se presentan disminuciones en los contenidos de humedad correspondientes al límite líquido (W_{ll}) e incrementos altamente significativos en el límite plástico (W_{lp}). Esto conduce en ambas alternativas a disminuciones en el índice de plasticidad (IP).

Los resultados más relevantes en este sentido tienen lugar en la variante donde se empleó la vinaza pura en dosis de $100 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ (Tabla N°27), así como para la dilución 1/5 en el efecto acumulativo (Tabla N°30).

Uno de los aspectos a destacar en las modificaciones del residuo en las propiedades físicas son los incrementos en la humedad correspondiente al límite plástico, también denominado humedad óptima para el laboreo. Al respecto Lorenzo (1992) y Morales et al., (1999), señalan que la materia orgánica y el calcio intercambiable tienden a incrementar la humedad en el límite plástico, ocurre entonces un mejoramiento del estado estructural del suelo y en consecuencia la relación W_{lp}/W_{cc} decrece.

4.4. Tratamiento energético de las propiedades físicas. Diagrama del estado físico del suelo.

Cabrera (2000), propone un enfoque agrofísico para la evaluación del mejoramiento de los suelos en el ejemplo de los Vertisoles, el cual se ha tenido en cuenta en nuestro caso para

evaluar las modificaciones inducidas por la vinaza en las propiedades físicas del suelo objeto de estudio.

A partir de la relación que se establece entre el potencial del agua (presión equivalente) y contenido de humedad en el suelo (Curva Hidrofísica Fundamental) es posible realizar el diagrama del estado físico y estudiar dicho estado de forma integral. Los diagramas permiten caracterizar los diferentes estados críticos, y establecer la relación entre los niveles energéticos de la humedad del suelo y las propiedades estructuro funcionales. Además, se caracteriza también el comportamiento mecánico, la distribución funcional de los poros y la magnitud de las diferentes categorías de humedad.

La Fig. N°3 muestra el diagrama del estado físico del suelo para la capa superficial en las variantes control y 150 m³.ha⁻¹ de vinaza pura para la primera y quinta cosecha (efecto residual). La Fig. N°4 muestra las curvas correspondientes al control (control) y la variante 1/5 a los 2 y 5 años de evaluado el experimento, en las que se aprecia el efecto acumulativo y residual respectivamente.

En general las curvas son típicas para un suelo cuya parte mineral está representada por la montmorillonita saturada de cationes magnesio y calcio.

Cuando se aplica el residuo de destilería ocurren cambios singulares en el estado físico, con un reflejo directo en lo que se denomina el diagrama estado físico del suelo.

Para la variante 1/5 (efecto acumulativo) la curva en la región caracterizada por los bajos potenciales (primeros potenciales críticos Ψ^I y Ψ^{II}) y donde predominan las fuerzas de carácter superficial se modifica, la tendencia es al decremento de los contenidos de humedad W^I y W^{II} , definida por estos potenciales y que corresponden a la humedad en el limite de contracción W_c y la humedad de marchites W_m respectivamente (Voronin, 1990).

En el primer estado crítico sobre la lamina acuosa < 10 Amstrong actúan todos los tipos de fuerzas de adsorción, como por ejemplo, las fuerzas covalentes y de puente de hidrógeno de la molécula de agua con los átomos que se encuentran sobre la superficie de la fase sólida (fuerzas de acción cercana). La modificación de la microestructura del suelo en las condiciones de esta variante, en el sentido de las disminuciones de la dispersión y otros cambios en las propiedades físico químicas (incremento de los contenidos de calcio en el complejo absorbente con su menor coeficiente de hidratación con respecto al sodio), permiten explicar el comportamiento de la curva en la región del primer potencial crítico (Ψ^I). Desde el punto de vista físico el decrecimiento de la humedad en el límite de contracción significa la reducción del volumen de agua “muerta” del suelo.

En el segundo estado crítico a la acción debilitada de las fuerzas superficiales sobre la lámina de agua se adiciona la acción de la superficie equipotencial de separación líquido-gas, paralela a la superficie de la fase sólida, y por consiguiente, con curvatura positiva. La microagregación en estas condiciones, explican el comportamiento de la curva en este estado. Las modificaciones en la humedad de marchites aseguran el incremento de la disponibilidad del agua para las plantas.

Para el tercer estado crítico se establece el equilibrio entre las fuerzas superficiales y las del menisco, los núcleos de agua alrededor de los distintos elementos sólidos del suelo se unen y dan lugar a la continuidad del líquido en los capilares del suelo.

Durante el secado ocurre lo contrario; es decir, la ruptura capilar del fluido, y tiene lugar la disminución brusca de la conductividad hidráulica del suelo y de la movilidad del agua. Durante el secado a partir de W^{III} el suelo se comporta como un cuerpo elástico-frágil. Para el tercer estado crítico se establece el equilibrio entre las fuerzas superficiales y las del menisco,

los núcleos de agua alrededor de los distintos elementos sólidos del suelo se unen y dan lugar a la continuidad del líquido en los capilares del suelo.

Durante el secado ocurre lo contrario; es decir, la ruptura capilar del fluido, y tiene lugar la disminución brusca de la conductividad hidráulica del suelo y de la movilidad del agua.

Para el caso analizado la humedad correspondiente al tercer estado crítico (W^{III}) se incrementa notablemente, lo que significa alcanzar de forma más rápida el momento óptimo para el laboreo, con gran trascendencia desde el punto agronómico.

También significa disminuir las pérdidas de humedad, las que tienen lugar fundamentalmente en este estado por transpiración. La evaporación física ocurre sólo a expensa de los vapores de agua que se difunden a través de los poros del suelo.

El contenido de humedad W^{IV} , se asocia al concepto de capacidad de campo, por lo que resulta útil su uso para la definición rigurosa de esta importante “constante” que, en opinión de Ruiz y Utset (1995,1999), actualmente se considera un concepto arbitrario y no una propiedad intrínseca del suelo. En este sentido, se aprecian disminuciones significativas en los contenidos de humedad en este estado para la variante analizada.

Al ser los Vertisoles suelos que se caracterizan por una alta capacidad de retención hídrica, la utilización del residuo de destilería en la alternativa analizada, contribuye a modificar el régimen de humedad y por lo tanto, a contrarrestar uno de sus principales factores limitantes. Las modificaciones inducidas en el estado estructural del suelo, es la causa fundamental de los cambios operados en dicho régimen.

Comportamiento similar reporta Orellana, (1997) al estudiar el estado físico de los Vertisoles cubanos.

El contenido de humedad W^V correspondiente al quinto estado crítico, (cuando se establece el equilibrio entre las fuerzas del menisco, la lamina plana y las fuerzas gravitatorias), experimenta determinado decrecimiento en la variante analizada con respecto al control. Esta humedad se corresponde en la práctica con la humedad del límite líquido (W_{II}).

Al analizar el efecto residual en esta variante (1/5) en la quinta cosecha se denota un comportamiento de la curva con sus potenciales críticos similar al efecto acumulativo. Se advierte, como aún persisten las modificaciones en el estado físico del suelo, las que se reflejan a través de su diagrama para este caso.

Los resultados del enfoque agrofísico de carácter energético para las condiciones del suelo bajo los efectos de la vinaza pura en la dosis de $150 \text{ m}^3/\text{ha}$ se muestra en la Fig.N°3.

El comportamiento de las curvas con los diferentes estados críticos (Diagrama del Estado Físico del Suelo) es similar al efecto acumulativo y residual de las diluciones.

Los valores de humedad de equilibrio correspondiente a los potenciales críticos en esta alternativa experimentan variaciones en menor cuantía que para el efecto acumulativo de las diluciones, y por tanto, el suelo en el efecto residual se acerca más a las condiciones del control.

4.4.1. Modificaciones inducidas por el residuo de destilería puro y en dilución en las magnitudes relacionadas con el movimiento del agua en el suelo.

En cuanto a la permeabilidad del suelo, como una propiedad relacionada con las propiedades estructuro-funcionales y a la vez limitante física importante en los Vertisoles, se seleccionó para su evaluación el indicador velocidad de infiltración en condiciones de campo.

Las modificaciones que han tenido lugar en el estado estructural del suelo durante las aplicaciones del residuo de destilería puro y en dilución tienen una importante repercusión en las magnitudes físicas relacionadas con el movimiento del agua en el suelo, específicamente en la velocidad de infiltración (V_i).

La velocidad de infiltración se correlaciona estrechamente con la composición granulométrica, características químicas, estado estructural, porosidad, contenido de agua y duración del humedecimiento (Kovda y Rozanov, 1988; Millán et al., 1998).

La Fig. N°5 muestra la curva de velocidad de infiltración en la vinaza en dilución para la variante control y la 1/5 en el efecto acumulativo y el residual en la quinta cosecha. La Fig. N°6 corresponde a la vinaza pura en la dosis de $150 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ en caña planta y en el efecto residual.

Estos suelos en condiciones normales, es característico que las capas inferiores presenten una reducida permeabilidad, lo cual entorpece el movimiento vertical del agua. El mejoramiento del estado estructural y el incremento del volumen de macroporos en particular hasta la segunda profundidad cuando el suelo fue tratado con el residuo de destilería, dieron lugar a aumentos significativos de la velocidad de infiltración, lo que indica de manera general un mejor paso del agua hacia las capas más profundas.

Cairo (1990), al estudiar los efectos de la cachaza en el mejoramiento de suelos pesados, encontró que determinadas dosis de la misma favorecen la estabilidad de la estructura influyen de forma positiva en su acondicionamiento hidrofísico.

Resultados similares al utilizar diferentes enmiendas orgánicas han obtenido (Lorenzo 1992; 1998; Curbelo, 1998b; Cerda 1998).

Al analizar la curva correspondiente a la variante 1/5, con respecto a la suspensión de las aplicaciones del residuo por 3 años, se observa una disminución en la velocidad de infiltración del suelo, la cual si la comparamos con los resultados del efecto acumulativo es evidente. Un comportamiento similar se tiene en las condiciones del suelo bajo los efectos de la vinaza pura en el efecto residual en la quinta cosecha. Esto se debe fundamentalmente, al deterioro que en el estado físico del suelo se va produciendo. En un suelo con mala estabilidad estructural, la velocidad de infiltración tiende a disminuir durante el proceso de humedecimiento, rompiéndose los agregados, y dando lugar a la obstrucción de los poros mayores, lo que dificulta el paso del agua a través de los mismos (Romkems et al., 1990; Loch y Foley, 1994; Loch, 1994; Hairsine y Hook, 1995; Poireé y Oiller, 1996; Amézquita et al., 1997; Amézquita y Londoño, 1997; Amézquita, 1998; Lal, 1998; Stone y Márquez, 1999).

Las modificaciones inducidas por el residuo de la producción de alcohol en la velocidad de infiltración del suelo atestiguan también un régimen de humedad más favorable para las plantas en estas condiciones.

4.5. Efectos de la vinaza pura y diluida en los rendimientos del cultivo de la caña de azúcar.

El residuo de destilería al utilizarse de forma pura, actuó favorablemente sobre el crecimiento y desarrollo de la caña de azúcar. Al evaluar los principales parámetros que definen el rendimiento tales como: la altura de los tallos, el diámetro y el número de tallos por metro, se comprobó que los mismos se incrementaron de manera significativa en todas las parcelas tratadas con respecto al control en caña planta.

El rendimiento en caña planta (Tabla N°32) se incrementó significativamente en las variantes tratadas con respecto al control, correspondiendo los valores más altos al tratamiento de 150 m³. ha⁻¹ (119 t.ha⁻¹). En esta cepa se obtiene con la fertilización mineral un rendimiento similar a cuando se aplica la vinaza pura, fundamentalmente para la dosis mencionada.

Al evaluar el efecto residual en el primer retoño, la variante de 150 m³. ha⁻¹ alcanzó los rendimientos más altos (130.87 t.ha⁻¹).

El rendimiento obtenido en las cosechas posteriores demuestra el efecto residual de la vinaza pura sobre el cultivo de la caña de azúcar (Tabla N°33). Por ejemplo, en la quinta cosecha con la dosis de 150 m³. ha⁻¹ se logra un rendimiento significativamente superior al control.

Para el caso de las diluciones de vinaza tanto en caña planta (Tabla N°34) como en los retoños el rendimiento y sus componentes se incrementaron notablemente.

En la primera cosecha para la variante 1/5 se obtienen rendimientos de hasta 146 t.ha⁻¹, comparados con el control (89.23 t.ha⁻¹). En primer retoño se alcanzó en dicha variante 156 t.ha⁻¹, lo que se corresponde con el efecto acumulativo producido.

En el efecto residual a la quinta cosecha (Tabla N°35) el rendimiento aún se mantiene elevado, lo cual es más notable en la variante 1/5.

Los resultados obtenidos permiten afirmar que el residuo de destilería en las alternativas empleadas, garantizan rendimientos altos con fuerte efecto residual sobre el cultivo. Además, de constituir una fuente de agua y nutrientes capaz de asegurar los requerimientos nutricionales de la caña de azúcar.

Cairo (1986); Cepero y Hernández (1991), en Vertisoles tratados con diferentes dosis de cachaza, al igual que Lorenzo (1992), para un suelo Ferralítico amarillento bajo efecto de diferentes dosis del residuo de producción de levadura torula, encontraron aumento de los

rendimientos del cultivo, los que atribuyen al mejoramiento del estado físico del suelo y a los nutrientes incorporados por los residuos.

Los parámetros mediante los cuales se evalúa la calidad de los jugos (Brix, Pol y Pureza) no experimentaron variaciones ante las aplicaciones del residuo de vinaza en ninguna de las alternativas y años evaluados. Lo que se corresponde con resultados obtenidos por Arzola (1988); en experimentos donde utilizó residuos de producción de levadura torula y crudo. Skandalariallis et al., (1995) y Cabrera (1999) concluyen de manera similar; no obstante, Paneque et al., (1989), encontraron que dosis altas del residuo de torula (mayores de 2 250 m³.ha⁻¹) ejercieron efectos desfavorables sobre el pol en caña.

Ante aplicaciones de vinaza pura en caña planta (Fig.Nº7) se presenta una respuesta del cultivo casi lineal con dosis desde 50 hasta 150 m³. ha⁻¹, momento en que se alcanza el máximo rendimiento agrícola y a partir del cual se comienzan a manifestar efectos depresivos con la aplicación de dosis más elevadas. Durante el primer retoño, independientemente que es donde se alcanza el mayor rendimiento agrícola, esta dependencia es menos marcada. En el efecto residual en la quinta cosecha (Fig.Nº9), la relación entre las dosis y el rendimiento es mucho menos marcada.

Para el caso de las diluciones en caña planta (Fig Nº8), se presenta una respuesta más acentuada que cuando tuvieron lugar aplicaciones del residuo puro, lo que se expresa en el ajuste logrado al analizar los coeficientes de determinación con valores más altos. La dependencia del rendimiento de las dosis fue marcado durante el efecto acumulativo, donde con la aplicación cantidades entre 120-150 m³ de vinaza por ha⁻¹, se logra el rendimiento máximo.

En la Tabla N° 36, 37 y 38 y en las Fig. N°10 ab y 10c, se muestran los resultados del análisis de componentes principales para los tres años de evaluación del experimento en el caso de las diluciones de vinaza. En el primer año (Tabla N° 36) la primera componente explica el 74,6 % de la variabilidad total y en ella aparecen todas las variables analizadas, con excepción de las relacionadas con el análisis mecánico y de estructura, mientras que la segunda componente explica sólo el 10.31 % de la variabilidad total.

A partir de estos resultados se realizó un análisis de Regresión Lineal Múltiple con la finalidad de obtener la ecuación que posibilite predecir el comportamiento de los rendimientos agrícolas en función de todos los parámetros estudiados.

El análisis de componentes para el segundo año (Tabla N°37), muestra que la primera componente explica el 81.99 % de la variabilidad total y en la cual a diferencia del segundo año se observan más variables (propiedades del suelo) correlacionadas entre sí. En este sentido, la ecuación de regresión está determinada por un número mayor de variables que determinan el comportamiento de los rendimientos.

En el efecto residual a la quinta cosecha (Tabla N°38), los resultados advierten un comportamiento de las propiedades sobre los rendimientos similares al primer año. De esta forma, la primera componente explica el 69.47 % de la variabilidad total, mientras que la segunda solo el 10.19 %. En cuanto a la ecuación de regresión obtenida, podemos apreciar cierta similitud con la que se obtuvo para caña planta.

Estos resultados demuestran las amplias posibilidades de utilización de la (vinaza), como modificador de las propiedades físicas y químicas de los Vertisoles dedicados al cultivo de la caña de azúcar, queda evidenciado entonces, el efecto positivo que desempeña este residuo en el mejoramiento de las propiedades físico químicas los Vertisoles y los rendimientos de los

cultivo de la caña de azúcar, corroborando de esta forma los resultados obtenidos por (Yerima et al., 1984; Urbina et al., 1995).

Duquesne (1998) y Cabrera (1999), reportan efectos favorables de distintas dosis de cachaza sobre las propiedades hidrofísicas (% de microporos, porosidad de aireación, permeabilidad, etc.) de un suelo montmorillonítico y su relación con los rendimientos de la caña de azúcar. En todos los casos analizados se manifiesta una alta dependencia entre propiedades evaluadas y los rendimientos, con coeficientes de correlación altos y significativos. Por su parte, Lorenzo (1998), Zimback y Cataneo, (1998), obtuvieron correlaciones altamente significativas entre distintos índices físicos (coeficiente de dispersión, volumen total de poros, poros ocupados por aire, humedad activa, densidad del suelo y coeficiente de filtración) y el rendimiento de la caña de azúcar y sus componentes en un suelo Ferralítico amarillento bajo el efecto de mejoradores orgánicos.

4.6. Modificaciones producidas en las propiedades físicas y químicas de los Vertisoles tratados por más de quince años con la mezcla de vinaza y el residuo de producción de azúcar crudo. (Experimento N° 3)

En la (Tabla N°39) se muestran las principales características químicas y físico químicas de los Vertisoles en las condiciones del experimento N°3.

Con relación al pH cuando se estudió tanto en agua como en cloruro de potasio, se observa que sus valores se encuentran en rangos que oscilan entre ligeramente y medianamente alcalino, lo cual es característico para suelos formados a partir de materiales carbonatados y con una fuerte saturación de bases en su complejo absorbente. No se presentan diferencias

significativas con relación a la acidez entre los bloques 215 (control) y 206 (tratado), de manera que el residuo no modificó este importante índice.

Las aplicaciones de mezcla de residuos de crudo y destilería por más de quince años, modificó los contenidos de materia orgánica, los que son superiores cuantitativamente con respecto a las aplicaciones de vinaza pura y en dilución en condiciones experimentales, como se analizó anteriormente. Se puede observar además, como en los suelos del bloque tratado la materia orgánica difiere significativamente con respecto al suelo del bloque control. La alternativa empleada es una fuente apropiada de materia orgánica a largo plazo para los suelos, al lograr estabilidad en sus contenidos en el tiempo.

Los contenidos fósforo y potasio asimilables alcanzados en el bloque tratado en ambas profundidades son superiores al bloque control. Se demuestra que el uso reiterado por más de quince años de esta mezcla es una fuente apropiada de aporte de estos nutrientes al suelo y una importante alternativa de suministro de los mismos. Esta contribuye no sólo a incrementar la fertilidad fosfórica y potásica de los Vertisoles estudiados, lo que convierte a esta alternativa en una práctica de inestimable valor, sino también a mejorar su disponibilidad para las plantas y en consecuencia, lograr la saturación de los puntos en el suelo donde se lleva a cabo su fijación.

Entre los cationes cambiabiles se aprecia modificación en sus contenidos con incrementos para el calcio, el magnesio y el potasio, no así para el sodio, el cual disminuyó significativamente en el bloque tratado. La importancia del incremento de estos cationes y su influencia en el suelo y en los rendimientos de la caña de azúcar ha sido objeto de investigaciones entre las que se destacan las realizadas por Arzola et al., (1996); Paneque y González (1987) y Rodríguez et al., (2000).

Paneque et al., (1989) al estudiar el efecto de la mezcla de residuos de destilerías, crudo y refino en un suelo Oscuro plástico encontraron que todos los cationes intercambiables aumentaron con excepción del magnesio que no sufrió variación. Comprobaron además, que las aplicaciones continuadas durante tres años produjeron efectos acumulativos en el suelo, donde el potasio alcanzó valores extremadamente altos.

En cuanto a la capacidad de cambio de bases (valor S) y catiónico (valor T), la mezcla de crudo más destilería incrementó de manera significativa sus valores en el suelo tratado para todas las profundidades. Se aprecia por tanto, el efecto positivo que sobre estas importantes propiedades ejerce dicha alternativa. Bach et al., (1990) al aplicar vinaza y residuos líquidos procedentes del CAI "Héctor Molina" notaron incrementos en la capacidad de cambio de bases de los suelos tratados, lo que elevó su fertilidad y capacidad productiva.

Al analizar la composición granulométrica (Tabla N°40) se aprecia que no experimenta variaciones como consecuencia de las aplicaciones de la mezcla, lo que denota la estabilidad característica de esta importante propiedad. Sin embargo, la microagregación en el suelo tratado se favoreció notablemente en la capa superficial y en las restantes profundidades, con importantes disminuciones del coeficientes de dispersión, existiendo en estas condiciones una menor cantidad de material sólido disperso.

La composición y estabilidad de la microestructura en las condiciones del suelo en el bloque control no es igual a las que presenta el suelo del bloque tratado. En este caso, el manejo intensivo a que han estado sometidos tradicionalmente estos suelos es la causa fundamental de la degradación de su estado microestructural.

El análisis de la composición de agregados para el suelo control (Tabla N°41), advierte una disminución de los agregados agrónomicamente más valiosos con relación al suelo bajo los

efectos de la mezcla (menor coeficiente de estructura) (Tabla N°42). Similar comportamiento se aprecia para el contenido de agregados estables al agua.

De la interpretación de los resultados anteriores se infiere como la mezcla de los residuos estudiada permite, la recuperación de la estructura del suelo bajo condiciones de manejo intensivo.

El análisis de las principales propiedades físicas, hidrofísicas y porosas evaluadas para ambos bloques se ofrecen en las Tablas N°43 y 44. Como aspecto importante, se destaca las disminuciones producidas por los residuos en la densidad del suelo del bloque tratado, lo que contribuye a un aumento de la porosidad total y de aireación y al establecimiento de una mejor relación agua-aire en estos Vertisoles. Se aprecia además, un mejoramiento en las propiedades que determinan la capacidad hídrica de estos suelos, sobre todo en las referidas a la humedad de marchites (W_m) y la humedad a capacidad de campo (W_{cc}). En estas magnitudes se producen disminuciones de sus valores en el bloque bajo efecto del mejorador con respecto al control.

La plasticidad como una de las propiedades importantes que define el uso y manejo de los Vertisoles, experimenta modificaciones en el bloque tratado. Se manifiesta, fundamentalmente un incremento del contenido de humedad correspondiente al límite plástico con relación al suelo no tratado. Anteriormente señalamos, las implicaciones que se derivan de esta modificación y su repercusión en el manejo de estos suelos. La contribución realizada por la materia orgánica y los cationes intercambiables, principalmente el incremento del calcio y las disminuciones del sodio, nos permite considerar lo factible que es esta alternativa para tales fines.

El enfoque agrofísico para la evaluación del mejoramiento de los Vertisoles se ha tenido en cuenta para el caso del manejo de la mezcla de vinaza con el residuo de la producción de azúcar crudo.

La Fig.Nº11, ofrece la curva hidrofísica fundamental expresada a partir del Diagrama del estado físico para el bloque control y el tratado.

La mezcla produce modificaciones en el estado físico del suelo. La curva experimenta variaciones en las regiones de los diferentes potenciales críticos. Sobresaliendo en este sentido, las ocurridas en las propiedades estructuro-funcionales correspondientes al tercer y cuarto estado crítico (humedad en el límite plástico y humedad a capacidad de campo).

Se demuestra como el uso continuado de la mezcla da lugar a un efecto acumulativo que repercute positivamente en el complejo de propiedades físicas de los Vertisoles, reflejando esto, el mejoramiento logrado y la diferenciación con el suelo no tratado, donde el estado físico presente es el resultado del manejo agrotécnico que tradicionalmente se realiza.

El análisis de los rendimientos durante el período de tiempo que se realizó el pesquisaje (Tabla Nº39), permite diferenciar el bloque tratado con relación al no tratado, entre los que se presentan diferencias significativas. La mezcla de residuos de crudo y destilería por más de quince años se presenta como una alternativa sostenible y ecológicamente segura para elevar los rendimientos del cultivo de la caña de azúcar, a través del mejoramiento integral que sobre las propiedades de los Vertisoles produce.

4.7.Evaluación económica de los sistemas de manejo de la vinaza.

El efecto económico inmediato más importante del presente trabajo radica en el incremento de los rendimientos del cultivo de la caña de azúcar y el ahorro por concepto de no utilizar

fertilizantes minerales, al emplearse con estos fines un producto que tradicionalmente se vierte al medio ambiente, y provocan una fuerte contaminación del mismo.

La (Tabla N°45), muestra los indicadores técnico económicos evaluados en cada variante en caña planta, primer retoño y durante la quinta cosecha (efecto residual) para aplicaciones de vinaza pura. Un análisis de dicho cuadro nos permite asegurar que es la variante donde se aplicó $150 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ de vinaza pura en plantación en la que se logra el mejor comportamiento. La diferencia en rendimientos en caña planta y primer retoño fue de 34 t/ha y 38.19 t/ha respectivamente con respecto al testigo, por lo que se obtienen ganancias adicionales en el orden de los 525.14 y 616.00 \$/ha.

Al analizar el comportamiento de la variante en que se aplicó fertilización mineral, se constata que independientemente de haberse obtenido rendimientos de 113 t/ha, los que son superiores durante caña planta a algunos tratamientos que recibieron los residuos ($50,200$ y $250 \text{ m}^3/\text{ha}$), se obtienen valores de ganancia inferiores a estas variantes. Lo que se explica por los costos de la fertilización, los cuales son elevados al considerar las aplicaciones de fertilizantes.

El comportamiento de la variante de $150 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ se acrecienta durante el primer retoño con valores de ganancia y rentabilidad más elevados, así como los menores costos por peso de producción.

La utilización de la alternativa de diluir la vinaza en agua (Tabla N°46), indica un comportamiento similar al caso anterior. Las aplicaciones continuadas (efecto acumulativo) superan favorablemente en la variante 1/5 todos los indicadores evaluados con respecto al resto de los tratamientos. En esta variante se obtuvo un incremento de los rendimientos de 70.22 t/ha con respecto al control y ganancias adicionales del orden 1 150.29 \$/ha.

Para las alternativas utilizadas se aprecia en el efecto residual a la quinta cosecha como independientemente de las dosis y diluciones, se elevan de manera considerable todos los indicadores con respecto al control, ello demuestra las ventajas que desde el punto de vista técnico económico tiene el empleo de este residuo en la agricultura.

Un análisis de las posibilidades de aplicación de la vinaza en las diferentes alternativas de manejo, permite considerar que con su utilización pura (como enmienda orgánica) a razón de una aplicación de $150 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ durante todo el ciclo en caña planta se beneficiarían 2 000 hectáreas de caña.

La variante de diluir la vinaza en agua en la relación 1/5, que es la de mejor comportamiento desde el punto de vista de aporte de nutrientes, y por consiguiente donde se obtienen los mejores rendimientos tanto en el efecto acumulativo como residual, al aplicarla a razón de dos riegos en caña planta y dos riegos en el primer retoño se beneficiarían 1 500 hectárea de caña.

La alternativa de utilizar la mezcla del residuo de producción de azúcar crudo y destilería a razón de un riego durante todo el ciclo, ya sea en caña planta o en los restantes retoños una vez mezclados estos efluentes en una proporción vinaza-crudo 1/6, y con norma parcial neta de $300 \text{ m}^3/\text{ha}$, recibirían el beneficio de una importante fuente de agua y nutrientes anualmente, unas 7 000 hectáreas.

5.CONCLUSIONES.

La vinaza puede ser utilizada en las alternativas pura (como enmienda orgánica) o como agua para riego, ya sea mezclada con agua clara o con el residuo de la producción de azúcar crudo.

Su fuerte acidez no limita su utilización, al no producir variaciones en el pH de estos suelos.

Su composición química, dada fundamentalmente por los altos tenores de materia orgánica y otros nutrientes como el potasio, hace que este residuo adquiera un inestimable valor fertilizante. Los incrementos producidos en los contenidos de fósforo y potasio en el suelo permiten prescindir de la fertilización mineral de la caña de azúcar por un periodo de hasta cinco años. El estado líquido en que este residuo se maneja es la causa de los aumentos de los niveles de estos nutrientes en la parte baja del perfil.

El residuo produce modificaciones en los cationes intercambiables del suelo. A pesar de los incrementos significativos del potasio y las disminuciones del magnesio para las alternativas pura y diluida, no se afectan las relaciones intercatiónicas estudiadas. Estos residuales constituyen una importante vía para disminuir los niveles de sodio en estos suelos y contrarrestar sus efectos negativos.

La utilización de la vinaza produce incrementos notables en los contenidos de materia orgánica, por lo que esta práctica se convierte en una alternativa eficaz para atenuar la degradación a que estos suelos están sometidos. Se modifica de forma sobresaliente el estado físico, con variaciones tanto en el estado micro como macroestructural del suelo. La

disminución significativa que en la densidad aparente tiene lugar es un indicador de las potencialidades que posee este residuo para contrarrestar el fenómeno de compactación presente generalmente en estos suelos. Por otra parte, también se producen modificaciones en el régimen hídrico, lo que se comprueba a partir de las variaciones encontradas en la humedad de capacidad de campo y en la velocidad de infiltración entre otras magnitudes.

El residuo modificó favorablemente las propiedades relacionadas directamente con el manejo agronómico y tecnológico de estos suelos, comprobándose a partir del aumento de la humedad correspondiente al límite plástico un mejor estado de tempero.

La aplicación continuada de mezcla de residuos de destilería y de producción de azúcar crudo por más de quince años modificó de forma positiva las características químicas del suelo, (se destaca en este sentido los contenidos de fósforo, potasio y materia orgánica); así como su estado físico. Se convierte esta alternativa en una práctica útil y eficiente con fines de mejoramiento y/o recuperación de suelos.

El efecto acumulativo de las diluciones durante dos años garantiza cambios elocuentes en las propiedades químicas y físicas de los Vertisoles, dando lugar a nuevo estado, el que repercute de manera positiva en el crecimiento y desarrollo del cultivo.

Se denota un marcado efecto residual en las principales propiedades del suelo y en el cultivo para las alternativas pura y en dilución. Dicho efecto se atenúa en el tiempo; sin embargo perdura en determinada magnitud hasta la quinta cosecha.

El enfoque agrofísico de carácter energético refleja con exactitud las modificaciones operadas en el estado físico de estos suelos con la utilización de la vinaza. En los diagramas presentados se comprueba las variaciones significativas en los diferentes estados críticos y en las humedades correspondientes a dichos estados.

Las modificaciones operadas en las propiedades físicas y químicas de estos suelos se revierten en un incremento de su potencial agroproductivo. Las alternativas propuestas elevan los rendimientos del cultivo de la caña de azúcar, con la consiguiente repercusión económica y social, al aprovecharse un residuo que tradicionalmente se vierte al medio ambiente. La variante de 150 m³/ha de vinaza pura y la dilución vinaza-agua 1/5 son las de mejor comportamiento.

6. RECOMENDACIONES.

1. Aplicar vinaza pura en el momento de la plantación de la caña de azúcar como enmienda orgánica en una dosis de $150 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$. No utilizar el residuo en esta forma hasta los cinco años.
2. Aplicar la dilución vinaza-agua 1/5 ($120 \text{ m}^3/\text{ha}$) en el momento de la plantación y en el primer retoño, en un número de dos riegos por ciclo a razón de $300 \text{ m}^3/\text{ha}$. No utilizar el residuo en esta forma hasta la quinta cosecha.
3. Aplicar mezcla de residuos de vinaza y producción de azúcar crudo (previamente mezclados en una proporción vinaza-crudo 1/6) a bloques cañeros durante plantación o retoños una vez durante el ciclo del cultivo a razón de $400 \text{ m}^3/\text{ha}$.
4. No aplicar fertilizantes químicos en las áreas que se utilicen residuos de destilerías puro y diluido en agua, siempre y cuando se garantice las dosis y diluciones anteriormente señaladas, de manera que se aproveche el efecto acumulativo y/o residual producido.
5. Realizar el monitoreo sistemático de las áreas bajo el efecto de estos residuos, de manera que se pueda evaluar la evolución del mejoramiento producido o el peligro que representan cuando no se usan correctamente.

7.BIBLIOGRAFÍA.

1. Agafonov,O.1978. Propiedades físicas de los Vertisuelos de Cuba relacionadas con las particularidades de su génesis. Ciencias de la Agricultura. A.C.C. # 3 p. 47-80.
2. Alfaro, R. 2000. Evaluación de la vinaza como fertilizante potasico en la caña de azúcar y su efecto sobre las propiedades químicas de un Inceptisol de Atenas de Alajuela. Dirección de Investigación y Extensión de la Caña de Azúcar. Documento de Internet.
3. Amézquita, E. 1998. Propiedades físicas de los suelos de los llanos orientales y sus requerimientos de labranza. Encuentro Nacional de Labranza. Villavicencio, Colombia, 29 p.
4. Amézquita, E.; Londoño, H. 1997. La infiltración del agua en algunos suelos de los llanos orientales y su implicación en su uso y manejo. Suelos Tropicales. V.27:163-168.
5. Amézquita, E.; Molina.L.D.; Chavez,E.L.1997. Características estructurales de los suelos de los llanos orientales de Colombia sometidos a varios sistemas de manejo. Suelos Ecuatoriales. 27: 151-156.
6. Anana, R. AUPEC. 1998. La vinaza de contaminante a fertilizante <http://mafalda.uniavalley.edu.co/2.aupec/vinaza.html>.

7. Angarica, E.; Montero, B.1984. Contenido y distribución de la materia orgánica en un suelo Oscuro plástico gleyzoso gris amarillento. INICA. III Jornada Científica. 14-16 Noviembre. Resúmenes.
8. Angel, L. M.; Vázquez, R. 1998. Interacción leguminosa – materia orgánica y su efecto en el suelo. Ciencia Agropecuaria FAUANL. México. 81: 17-22.
9. Angers, D.A.; Giroux, M. 1996. Recently deposited organic matter in soil waterstable aggregates. Soil Science Soc. Am. J.60: 154-155.
10. Angers, D.A.; Recous, S.; Alta, C. 1996a. Fate of carbon and nitrogen in waterstable aggregate during decomposition of wheat straw in situ. Eur. J. Soil Science. 26: 305-314.
11. Angers,D.A.; Bolinder,M.R.,Carter,E.G.,Gregorich,R.P.,Voroney,C.F.,Drury,C.1996b. Impact of tillage practices on organic carbon and nitrogen storage in cool humic soils of eastern Canada. Soil Tillage Research 12. 79-86.
12. Arrouays, D. 1994. Interét du fractionnement densimétrique des matières organiques en vue de la construction d'un modele bicopartimental d'évolution des stocks de carbone du sol. Exemple après défrichemet et monoculture de mes grains des sols de touyas. Comptes Rendus á L'Academic de Sciences. París. Série II: 318. 783-793.
13. Arrouays, D.; Pelissier, P. 1994. Changes in carbon storage in temperate humic loamy soils after clearing and continuos corn cropping in France. Plant and Soil: 160, 215-223.
14. Arzola, N. 1988. Informe de cumplimiento de la etapa para el PCT 008. EPICA de la Provincia de Cienfuegos, 28p.

15. Arzola, N.; Cairo, P. 1985. Monografía sobre suelos y fertilización de la caña de azúcar. Centro Agrícola. Año XII: 32-65.
16. Arzola, P.N.; Menéndez, A.; De León, M.; García,E.; Velarde, E. 1998. INICA. SERFE. Capítulo II. Bases para el empleo de fertilizantes y enmiendas. pp 37-132.
17. Arzola,N.1996. Enmiendas y fuentes alternativas de nutrimentos para la caña de azúcar. SERFE. MINAZ. INICA. Curso I, 29p.
18. Bach, T.; Martínez, A.; Mostelier, L.A. 1990. Uso agrícola de la vinaza mezclada con residual líquido de la producción de azúcar parda. Instituto de Suelos. Ministerio de la Agricultura. La Habana. Cuba, 128p.
19. Balesdent, J.; Baladane, M. 1996. Major contribution of roots to soil carbon storage inferred from raize cultivated soil. *Soil Biol. Biochem.*, 28: 1261-1263.
20. Balesdent,J.,Besnard,E.,Arrouays,D.,Chenu,C. 1998. The dynamics of carbon in particles size fraccion of soil in a forest cultivation sequense . *Plant and Soil* 201, 49-57.
21. Bautista, Z.F.; Durán-de-Bazúa, C. 2001. La materia orgánica tipo vinaza en el mejoramiento de Acrisoles y Fluvisoles. XV Congreso Latinoamericano y V Cubano de la Ciencia del Suelo. Centro de Convenciones "Plaza América". 11 al 16 de Noviembre del 2001. Varadero. Cuba. Programa y Resuménés. p 208.
22. Beare, M.H.; Hendrix, P.F.; Coleman, D,C. 1994. Waterstable aggregate and organic mater fraction in convectional and notillage soil. *Soil Science Soc. Am. J.*, 58: 777-786.
23. Bernal, N.; Morales, F.; Gálvez, G.; Jorge, I.1997. Variedades de caña de azúcar: Uso y manejo. Ed. IMAGO. INICA.

24. Besnard, C.; Chenu, J.; Balesdent, P. 1996. Fate of particulate organic matter in soil aggregate during cultivation. *Eur. J.S.S*, 47: 495-503.
25. Biriozin, P. N. 1987. Propiedades estructuro-funcionales de los suelos dilatables. *Métodos modernos de investigación*. Ed. Universidad de Moscú: 20-46.
26. Biriozin, P.N., Shein, E.V. 1988. Especificidades de la investigación del espacio poroso de los suelos dilatables. *Pochvovedenie*, 11: 63-68.
27. Boiffin. T., Monnier, G. 1982. Eats, propietés et comportements des sols : recherches et utilization des criteres de fertilité phisique. *Bull.Techn.Inf.Min.Agr.No.* 370-372 : 401-407.
28. Bontoux, L.; Vega, M.; Papameletiou, D. 1998. Tratamiento de las aguas residuales urbanas en Europa: el problema de los lodos. IPTS report. Vol 23. <http://www.jcr.es/pages/frepot.es.html>.
29. BUC. 2000. Reciclaje de Biosólidos. Una solución práctica. Comité de uso de biosólidos. BUC; siglas en Inglés.
<http://www.gov.on.ca/OMARFA/english/enviromental>.
30. Cabrera,S.; Lorenzo, O.R.; Plá, R. E.; Abreu, O.1999. Análisis cuantitativo y pronostico de la estructura de un Vertisol. *C.T.A. Vol.8 # 2*.
31. Cabrera, S. 1998. Mejoramiento de las propiedades hidrofísicas de Vertisoles cañeros. Tesis de Maestría en Ingeniería en Riego y Drenaje. UNICA. Ciego de Ávila.
32. Cabrera, S. 2000. Nuevo enfoque agrofísico para la evaluación del mejoramiento de los suelos en el ejemplo de los Vertisoles. Tesis en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Agrícolas. UNICA. Ciego de Ávila.

33. Cabrera, S.; Pérez O. C.; Abreu, E.O.; Plá, Elena 1996. Nuevo enfoque de la descripción del estado físico de los suelos. Resúmenes de la VIII Jornada Científica del INIFAT.
34. Cabrera,S. 1997. Influencia de la materia orgánica sobre la estructura del espacio poroso de un suelo oscuro plástico. VIII Jornada Científica del INIFAT. Resúmenes.
35. Cairo, P. 1982. Caracterización y mejoramiento de los suelos pesados y su relación con el cultivo de la caña de azúcar. Monografía. UCLV, 104 p.
36. Cairo, P.; Fundora, O. 1994. Edafología. Editorial Pueblo y Educación. Ciudad de la Habana. 476 p.
37. Cairo, P.; Moya, G.; Aguilar, J. 1994. Efecto de una dosis reducida de cal y niveles bajos de cachaza sobre las propiedades estructurales de un suelo Oscuro plástico. Centro Azúcar 2: 30-38.
38. Cairo, P.1986. Relaciones entre diferentes propiedades estructurales de los suelos. Centro Agrícola 92. Mayo-Agosto: 81-87.
39. Cairo, P.1995. Utilización del carbonato de calcio como mejorados de las propiedades físicas de los suelos de mal drenaje. II Encuentro Nacional de Agricultura Orgánica. Resúmenes: 78p.
40. Cairo,P. 1988. Evaluación físico química. Curso de Postgrado. Escuela de Ciencias Básicas. Departamento de suelos y aguas.
41. Cairo,P.; Machado,J.; Torres,P.; Rodriguez, I; Jimenez, R.; Ines Abreu. ; Rodriguez ,O.; Pineda,E.; Díaz,R.; Collazo, R. 1995. Mejoramiento y fertilización de los suelos en condiciones de una agricultura sostenible de la caña de azúcar. II Enc. Nac. de Agricultura. Orgánica. Programa y Resúmenes. La Habana. Cuba p: 89.

42. Cairo,P.;Carvajal, Malvis, Machado,J 1996. Como mejorar la bioestructura de los suelos degradados de la provincia de Santi Spiritus. *Agricultura Orgánica*, 23-78.
43. Cairo,P.1986. El papel de algunas propiedades generales del suelo sobre su estado físico. Facultad de Ciencias Agrícolas. UCLV.
44. Carvalho, E. J.; Moller, M.R.; De Matos, A.1997. The effect of mechanized timber harvesting on several physical properties of very clay yellow latosol in eastern Amazonia. IV Congreso de la Sociedad Cubana de la Ciencia del suelo. Resúmenes, p. 34.
45. Cepero, G.S.; Hernández, C.E. 1991. Efectos de la cachaza sobre las características microbiológicas en suelos de la costa norte de Villa Clara y su influencia sobre el rendimiento de la caña de azúcar. *Centro Azúcar*, 1: 40-52.
46. Cerda, A.1998. Seasonal variability of infiltration rates under contracting stope condition in south east Spain .*Geoderma*. V.69: 217-232.
47. Chenu, C., Tessier, D. 1998. Low temperature scanning electron microscopy of clay and organic constituents and their relevance to soil microstructure. *Scanning Microscopy* 9: 989-1010.
48. Christensen, B.T. 1995. Carbon in primary and secondary organomineral complexes. M.R. Carter and Stewart Eds *Structure and organic matter storage in agricultural soils*. Adv. Soil Sci. CRC Press, Boca Raton, F.L: 97-75.
49. Cid, G.; Herrera, J.; Sierra, O.L.; López, Teresa. 2001. Gestión del agua en el manejo integral de los Vertisuelos bajo diferentes agroecosistemas. XV Congreso Latinoamericano y V Cubano de la Ciencia del Suelo. Centro de Convenciones “Plaza

- América”. 11al 16 de Noviembre del 2001. Varadero. Cuba. Programa y Resumenes. p 202.
50. Cid, G.1992. Efecto de la contracción dilatación sobre la transferencia de agua y aire en suelos con arcillas dilatables del valle del Cauto. Tesis de Doctorado. INIFAT.
51. Cid, G.; Gabidoche,Y.; Herrera, J. 1997. Influencia de las sales en los fenómenos de contracción dilatación en Vertisoles del Valle del Cauto. IV Congreso de la Sociedad Cubana de la Ciencia del Suelo y Reunión Internacional de Rihzosfera. Matanzas.
52. CIID. 1998. Caracterización general de los Ordenes de Suelos y Perfiles Representativos. <http://www.idrc.ca/library/document/103891/103891p.htm>.
53. Comerma, J.A. 1998. Propuestas para la taxonomía de Vertisoles. http://redpavfpolar.info.ve/agrotrop/v34_46/v346a017.html.
54. Conferencia del Ministro del Azúcar en la Quinta Mesa Redonda de la revista “The Economist” con el gobierno de Cuba. La Habana, 22-24 de Febrero 1999. <http://www.cubagob.cu/desecho/azucar.htm>.
55. Crawford,J.L., Verral,S.; Young,J.M.1998. The origin and loss of fractal scaling in simulated soil aggregates. Eur.J.Soil Science 484: 643-650.
56. Curbelo, M. R. 1998. Mejoramiento del drenaje en Vertisoles dedicados al cultivo de la caña de azúcar en la región norte de la provincia de Ciego de Ávila. Tesis de Maestría en Ingeniería en Riego y Drenaje. CICT: UNICA.
57. Curbelo,R.1998b. Drenaje Agrícola. Conferencias de Maestría en Riego y Drenaje. C.E.H. UNICA.

58. Dantur, N. 1996. Aprovechamiento agrícola de los residuos de la agroindustria de la caña de azúcar. Parte II. El uso de la vinaza. Avance Agroindustrial. Revista Trimestral. p 38-40.
59. Desjardin, T.; Andreux, F.; Volkoff, B.; Cerri, C. 1994. Organic carbon and content in soil and soil size fraction, their change due to deforestation and pasture installation in eastern Amazonia. Geoderma, 61: 103-118.
60. Dirección Provincial de Recursos Hidráulicos de Ciego de Ávila. 1998. Registro de cuencas hidrográficas y aguas subterráneas. 16p.
61. Duquesne, A.F. 1998. Influencia de la cachaza sobre las propiedades hidrofísicas de un suelo Oscuro plástico. Trabajo de Diploma. Facultad de Ciencias Agropecuarias. UCLV.
62. Elizalde, G.; Rondon, C. 1998. Propuesta de un modelo de estructuración de los suelos. Revista de la Facultad de Agronomía. Universidad Central de Venezuela, 24 1: 110. <http://www.redpav.fpolar.info.ve/fagro.html>.
63. Estrategia Ambiental Nacional 1999. CITMA. La Habana.
64. Fernández Pérez, Livia; Fundora, Alina. 1996. Minerales presentes en las arenas de Vertisoles cubanos. Ciencias Técnicas Agropecuarias. 61: 33-38.
65. Fernández, L.; Garcés, P. 1997. Uso de las técnicas físicas en el estudio de los suelos. Primer Simposium Internacional sobre Técnicas Nucleares y de Avanzada en la Agricultura, la Salud y la Industria. Ciudad de la Habana.
66. Fiago, A.; Rodríguez, M. 1998. Estudio de perfiles de humedecimiento con tuberías de doble conducto soterradas en un Vertisuelo Oscuro plástico. Ciencias Técnicas Agropecuarias, 73: 61-63.

67. Filgueira, R. R.; Fournier, L. L.; Piro, A.I.; Bethencort, D; Sarli, G. O.; Aragón, A. 1998. El proceso de fragmentación del suelo. Un enfoque fractal. Ciencia del Suelo 15. Argentina: 47.
68. Filgueira, R.R.; Sarli, O.G.; Soracco, G.; Roggiero, M.F.; García, M.G. 2001. La densidad aparente de agregados y la fractabilidad de un suelo. XV Congreso Latinoamericano y V Cubano de la Ciencia del Suelo. Centro de Convenciones "Plaza América". Varadero. Cuba. 11 al 16 de Noviembre del 2001. Programa y Resúmenes. p 45.
69. Fonseca, R.J. 1995. Como mejorar los rendimientos de la caña de azúcar en los suelos de mal drenaje. Revista Cañaveral. Vol. 14. Octubre Diciembre. p 11-15.
70. Fox, M.D.; Le Bissonais, Y. 1998a. Process-based analysis of aggregate stability effect on sealing infiltration and interrill erosion. Soil Science Am. J., 623: 717-724.
71. Fox, M.D.; Le Bissonais, Y.; Bruand, A. 1998b. The effect of ponding depth on infiltration in a crusted surface depression. Catena, 3: 132-145.
72. Gallardo, L.J.F. 1994. Dinámica de la descomposición orgánica en sistemas conservacionista. Memorias de VII Congreso de Ciencias del Suelo de Colombia: 31-37.
73. García del Risco, E.; Vázquez, F.A. 2000. Los suelos y fertilización de la caña de azúcar. Instituto Nacional de Investigaciones de la caña de azúcar. Ciudad de la Habana, 59p.
74. Garcia, R. 1999. Soil phosphorus. On-line. Disponible en: <http://taipan.nmsu.edu/mvpfpp/phosphor.html>. Conectado el 12 de Mayo de 1999.

75. Golchin, A.M.; Oades, J.O.; Skjemstad; Clarke, P. 1995. Structural and dynamics properties of soil organic matter as reflected by ^{13}C natural abundance, pyrolysis mass spectrometry and solidstate ^{13}C NMR spectroscopy in density fraction of an Oxisol under forest and pasture. *Australian Journal of Soil Research*, 33: 59-76.
76. Gómez, T.J.M.2000. Evaluación preliminar de la vinaza en la productividad de la caña de azúcar y sobre algunas propiedades de un suelo de la planicie del turbio. Informe Proyecto # 031293. Consejo de Desarrollo Científico, Humanístico y Tecnológico. Documento de Internet.
77. Gregorich, E.G.; Drury, C.F.; Ellert, B.H.; Liang, B.C. 1996. Fertilization effects on physically protected light fraction organic matter. *Soil Sci. Soc. Am. J.*: 60, 472-476.
78. Gutiérrez Castorena, Maria del Carmen; Ortíz, C.A.; Tavares Espinosa, C.A. 1995. Los suelos arcillosos hidromórficos del ex Lago de Texcoco. Manejo de suelos arcillosos para una agricultura sustentable: 333-341.
79. Hairsine, P.B.; Hook, R.A. 1995. Relating soil erosion by water to the nature of the soil surface. En: *Sealing, crusting and hard setting soils: Productivity and Conservation* Eds. H.B. So, G.D. Smith, S.R. Raine, B.M. Schafer, R.J. Loch. Australian Society of Soil Science, Brisbane: 77-91.
80. Hassink, J. 1993. Relationship between soil texture, physical protection of organic matter soil biota and C and N mineralization in grassland soils. *Geoderma*, 57: 105-128.
81. Haynes, R.J.; Swift, R.S. 1990. Stability of soil aggregates in relation to organic constituents and soil water content. *J.S.S.* 411: 73-83.

82. Hernández, J.A., Pérez, J.M., Bosh, I.D., Rivero, R.L., Durán, J.L., Cid, L.G., Ponce, L.D. 1995. Nueva Versión de la Clasificación genética de los Suelos de Cuba. MINAG.
83. Hoef, R., G. 1999. Phosphorus: Agronomic, Economic and Environmental Consideration. On-line. Disponible en <http://ext.agn.uiuc.edu/extension/PAAEEC.html>. Conectado el 18 de Agosto de 1999.
84. IFA. 1999. Plant Nutrient for Food Security. A message from the International Fertilizer Industry Association (IFA) to the FAO World Food Summit, November 1996. Disponible en: <http://www.fertilizer.org/PUBLISH/wfs.txt>. Conectado el 17 de Mayo de 1999.
85. Janse, J. F. 1998. Programa de biosólidos. Presentado en el taller de biósólidos en México. Ministerio del Medio Ambiente de Ontario, Canada. 6p.
86. Jastrow, J.D.; Boutton, T.W.; Miller, R.M. 1996. Carbon dynamics of aggregate associated organic matter estimated by ^{13}C natural abundance. Soil Science. Soc. Am. J: 60, 801-807.
87. Kapinos, V.A. 1990. Variación de las propiedades físicas de un suelo dernopodsódico bajo la acción de los abonos orgánicos y métodos de cultivo. Pochvovedenie, 5: 139-152.
88. Kaúrichev, I.S. 1984. Prácticas de Edafología. MIR. Moscú, 286 p.
89. Klimes, A. 1980. Los suelos de Cuba. Editorial Orbita. Tomo II.
90. Kosugi, K. 1997a. A new model to analyze water retention characteristics of forest soils based on soil pore radius distribution. J.For.Res. 2: 95-101.
91. Kosugi, K. 1997b. New diagrams to evaluate soil pore radius distribution and saturated hydraulic conductivity of forest soil. J.For.Res. 2: 95-101.

92. Kovda, V.A.; Rozanov, B.G. 1990. Edafología I. Escuela Superior Moscú, 400 p.
93. Labrador, M. J. 1997. La materia orgánica en los Agro sistemas. Edit. Mundi prensa. Madrid, España. Pp. 14,20,27.
94. Ladd, I.N.; Amato, M.; LiKai Zhon; Schultz, J.E. 1994. The influence of agronomic management practices on soil microbial biomass. *Soil Biol. Biochem*, 26: 821-831.
95. Lal, R.1998. Residue management, conservation tillage and soil restoration for mitigation greenhouse effect by CO₂ enrichment. *Soil Tillage Research*. 27 : 18.
96. Le Bissonais, Y.; Arrouays, D.1997. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: II. Application to humic loamy soil with various organic carbon contents. *European Journal of Soil Science*. 48: 39-48.
97. Le Bissonais, Y. 1996. Aggregate stability and assesment of soil crustability. II Application to humic loamy soils with various organic carbon contents *European Journal of Soil Science*: 48, 39-48.
98. Leinweber, P.; Schulten, H.1998. Advances in analytical pyrolysis of soil organic matter. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 47: 165-189.
99. León, M.E. 1990. Caracterización agroquímica de los suelos y efectos de los fertilizantes en la producción de la caña de azúcar en la provincia de Ciego de Avila. Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Agrícolas. INICA. Ministerio del Azúcar. p.
100. Leong, E.C., Rahardo, H. 1998. Permeability functions for unsaturated soil. *J. Geotech. Environg. Eng*. 123 (12) : 1118-1126.
101. Loch, R.J. 1994. A method for measuring aggregate water stability with relevance to surface seal development. *Australian Journal of Soil Science*, 32: 687-700.

- 102.Loch, R.J.; Foley, J.L. 1994. Measurement of aggregate breakdown under rain: Comparison with test of water stability and relationship with field measurements of infiltration. *Australian Journal of Soil Research*, 32: 701-720.
- 103.Lorenzo, O. R. 1998. Efectos de diferentes manejos tecnológicos del suelo sobre su estado físico. Proyecto "Cuencas ambientales del suelo "CORPOICA. Colombia,18p.
- 104.Lorenzo, R. 1992. Efecto del residuo de la producción de la levadura torula sobre el estado físico de los suelos Ferralíticos amarillentos dedicados a la caña de azúcar. Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Agrícolas. ISACA. Ciego de Ávila.
- 105.Lorenzo, R.; Armengol. J. E. 1997. Influencia de la vinaza como enmienda orgánica y en diluciones sobre las propiedades agrofísicas de un suelo Oscuro Plástico. Informe al Consejo Científico. UNICA.10p.
- 106.Lorenzo,O.R. 1998. Física de suelos un enfoque moderno. Fundamentos teórico prácticos. CORPOICA. Colombia, 43p.
- 107.Lorenzo, O. R.1998a. Caracterización física de los suelos Oscuros plásticos del CAI "Enrique Varona". Informe de resultados de investigación. UNICA.
- 108.Makeeva, V.I., Lapitski, S.A. 1990. Propiedades físico-mecánicas de los horizontes esléctico de Gruzia. *Pochvovedenie*. No. 3: 65-73.
- 109.Martínez, M.A.; Paneque, V.M.; Lara, D.;Ana N. Hernández. 1996. Utilización de los residuales azucareros en el fertiriego de la caña de azúcar como alternativa económica para disminuir los riesgos de contaminación ambiental. II Enc. Nac. de Agricultura Orgánica. Programa y Resúmenes. La Habana. Cuba p.33-35.

110. Metodología 2002. Utilización de los residuales de la industria azucarera en el fertirriego de la caña de azúcar. Ministerio del Azúcar. Comisión Nacional de Medio Ambiente. Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas. INCA. 15 p.
111. Millán, H.V.; Benito, R.M. 1998. Similaridad y escala fractal en el estado energético del agua en un vertisol salino de la Cuenca del Cauto. XI Seminario Científico. INCA.
112. Millán, V.H.; González, P.M.; Torres, O: D. 2001. Estructura fractal de los suelos. El caso especial de un vertisol. XV Congreso Latinoamericano y V Cubano de la Ciencia del Suelo. Centro de Convenciones "Plaza América". 11 al 16 de Noviembre del 2001. Varadero. Cuba. Programa y Resúmenes. p 44.
113. MINAG. 1999. Estrategia Ambiental del Ministerio de la Agricultura. Grupo de Gestión Ambiental del MINAG. En diskette, 50 p.
114. MINAZ. 1998. Curso I. Los suelos dedicados al cultivo de la caña de azúcar. INCA. 41 p.
115. Mollands, D.; Mohanly, B..P.; Jacques, D.; Foyen, I. 1996. Spatial variability of hydraulic properties in a multilayered soils profiles. Soil Science. 161: 167-181.
116. Montero, B.; Angarica, E.; Martín, G.; Pérez, E. 2001. Cultivo continuado en caña de azúcar, características químicas y extracción de nutrientes en Vertisuelos negros. XV Congreso Latinoamericano y V Cubano de la Ciencia del Suelo. Centro de Convenciones "Plaza América". 11 al 16 de Noviembre del 2001. Varadero. Cuba. Programa y Resúmenes. p 133.
117. Mora, G. M; Ordaz, V.; Castellanos, J.Z.; Aguilar, A.; Gavi, F.; Volke, H.V. 2001. Sistemas de labranza y sus efectos en algunas propiedades físicas de un Vertisol,

después de cuatro años de manejo. [http://www.chapingo.mx/terra/contenido/19/1 art 6774. pdf.](http://www.chapingo.mx/terra/contenido/19/1_art6774.pdf)

118. Morales, O.; Hernández, M, Pujol, R.; Maiña, C.; Aguilera, R. 1999. Medidas alternativas para el manejo y explotación de suelos arroceros afectados por salinidad. Primer Seminario Científico Internacional de Agrotécnia Tropical. Universidad de Camaguey. Resúmenes.
119. Narro, F. E. 1994. Física de Suelos con enfoque agrícola. Edit. Trillas. México. D.F, 195p.
120. Norma Cubana. NC 51:1999. Calidad del suelo. Análisis Químico. Determinación del porcentaje de materia orgánica. Oficina Nacional de Normalización.
121. Norma Cubana. NC 52:1999. Calidad del suelo. Determinación de las formas móviles del fósforo y el potasio. Oficina Nacional de Normalización.
122. Norma Cubana. NC 93-03-111: 1989. Determinación de la capacidad de intercambio catiónico y de los cationes intercambiables del suelo. Oficina Nacional de Normalización.
123. Norma Cubana. NC-ISO 10390:1999. Calidad del suelo. Determinación de pH. Oficina Nacional de Normalización.
124. Oberg, A.L., Salfors, G. 1998. Determination of shear strength parameters of unsaturated solits and sand based on the water retention curve. Geot. Testing J. 20 (1), 40-48.
125. Oleschko, K. 1997. Manejo eficiente de los Vertisoles. Sus propiedades y diagnostico. [http:// xinchao. Teledetección. fr/ dama/ cv personnel/ lc_oleschko. html.](http://xinchao.Teledetección.fr/dama/cv_personnel/lc_oleschko.html)

126. Orellana, G, Rosa.; Moreno, A.J.M. 2001. Suceptibilidad de los suelos cubanos a la degradación. XV Congreso Latinoamericano y V Cubano de la Ciencia del Suelo. Centro de Convenciones "Plaza América". 11 al 16 de Noviembre del 2001. Varadero. Cuba. Programa y Resúmenes. p 189.
127. Orellana, G.R.; Voronin, A.D.; Ortega, S.F. 1997. Física de los Vertisoles de Cuba I. Diagrama del estado físico. Memorias del Primer Simposium Internacional sobre Técnicas Nucleares y de Avanzada Aplicadas a la Agricultura, la Salud y la Industria. La Habana.
128. Orellana, Rosa. 1991. Estado físico de los Vertisoles cubanos en dependencia de su uso. Tesis de Doctorado. INIFAT. La Habana.
129. Orellana, Rosa. 1996. Estado físico del suelo, base fundamental de los rendimientos agrícolas. Resúmenes de la VIII Jornada Científica del INIFAT.
130. Orellana, Rosa. 1997. Influencia del estado físico de los suelos en el desarrollo de los cultivos. III Encuentro Nacional de Agricultura Orgánica. UCLV. Resúmenes: 24-25.
131. Orellana, Rosa.; Delgado, R. 1986. Utilización de las curvas de retención de humedad para la determinación de las principales propiedades hidrofísicas de los suelos. III Reunión Nacional de Investigaciones de Riego y Drenaje de la caña de azúcar. Caibarien.
132. Orellana, Rosa; Valdez, Magaly; Hernández, Oneida; Quintero P.L. 1995. Consecuencias de la aplicación excesiva de fertilizantes minerales en el estado físico de los suelos. II Enc. Nac. De A. Orgánica. Programa y Resúmenes. La Habana. Cuba p.13.
133. Orlov, A.S 1990. Química de suelos. Editorial de la Universidad de Moscú. 379p.

134. Ortíz, G.C.; Rivero, R.; Estrada, M.J. 2001. Régimen hídrico de Vertisuelos de Cuba y aspectos metodológicos esenciales para su estudio. XV Congreso Latinoamericano y V Cubano de la Ciencia del Suelo. Centro de Convenciones "Plaza América". 11 al 16 de Noviembre del 2001. Varadero. Cuba. Programa y Resúmenes. p 201.
135. Otero, J. L.; Andrade, M. L.; Marcet, P. 1997. Caracterización química y evaluación agronómica de dos tipos de lodos residuales. Invest. Agra.: Prod. Prot. Veg. España. 111:117-131.
136. Otero, Lazara; Sastriques, F.O.; Morales, Marisal. 1998. Participación de la arcilla y la materia orgánica en la capacidad de intercambio catiónico de Vertisoles de la provincia Granma. [http:// www.chapingo. mx /terra /contenido](http://www.chapingo.mx/terra/contenido).
137. Palma, R.M.; Arrigo, N.M.; Saubidet, M.I.; Conti, M.E. 1998. Bioindicadores: índices potenciales para evaluar la degradación del suelo. En: Avances en el manejo del suelo y el agua en la ingeniería rural latinoamericana. Ed. Board. Argentina:132-137.
138. Paneque, Pérez, V.M. 1998. Abonos Orgánicos: Conceptos Prácticos para su evaluación y aplicación. Folleto. La Habana, INCA.
139. Paneque, V.; Martínez, M.; González, P.; Velazco, Ana; Gómez, R.; De la Naval, B. 1989. Utilización de los residuales líquidos de la industria azucarera y sus derivados en el riego y la fertilización de la caña de azúcar, como alternativa económica para disminuir los riesgos de la contaminación ambiental. INCA. La Habana, 40p.
140. Paneque, V.M.; González, P.J. 1987. Utilización de las aguas residuales de los procesos de crudo, refinería y destilería del Central "Arquímedes Colina" como fuente de riego y fertilización para la caña de azúcar. 44 Congreso de la ATAC.

141. Peña, C. M. 1999. Mejoramiento de la tecnología de diseño y explotación de sistemas de micro riego en cítricos. Tesis de Doctorado. UNICA, 102 p,
142. Pérez, O.C.; Brydson, B.A.; Plá, R.E.; Cabrera, M.S. 1996. Aplicación de abono orgánico en franjas para el cultivo de la caña de azúcar. Enlace, 29: 19-24.
143. Poireé, M.; Oiller, C. 1996. Saneamiento Agrícola. Editorial Técnicos Asociados, S.A., Barcelona, 395 p.
144. Preciado, L. G. 1997. Influencia del tiempo de uso del suelo en las propiedades físicas, en la productividad y sostenibilidad del cultivo del arroz en Casanare. Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Colombia. Sede Palmira.
145. Primavesi, Ana. 1995. Manejo Ecológico del Suelo. 371p.
146. Puget, P. 1996. Une methode de fractionnement des matieres organiques particulaires des sols en fonction de leur localization dans les agrégats. C.R. Acad. Science. Paris. Séris II, 322: 965-972.
147. Quinteriro. R. 1998. Efecto de la adición de un lodo residual sobre las propiedades del suelo: experiencia de campo. Edafología. No. 5. pp. 110. España.
148. Ramirez, E.; Lucho, C.; Dendooven, L. 2001. Efectos de la adición de agua residual tratada y no tratada en la dinámica del Carbono y el Nitrógeno sobre las características de los suelos del distrito de riego 03 de Tula, Hidalgo. XV Congreso Latinoamericano y V Cubano de la Ciencia del Suelo. Centro de Convenciones "Plaza América". 11 al 16 de Noviembre del 2001. Varadero. Cuba. Programa y Resúmenes. p 131.
149. Rehm, G.; Schmitt, M.; Lamb, J.; Ramdall, G.; Busman, L. 1999. Understanding Phosphorus Fertilizer. On-line. Disponible en <http://www.extension.umn.edu/Document/>. Conectado el 18 de Agosto de 1999.

150. Rodríguez, M.; Chaves, M. 2000. Estudio del efecto químico valorado a nivel de laboratorio de la aplicación de seis dosis crecientes de vinaza en cuatro profundidades de dos tipos de suelos. Dystric haplustand y Ustic humitropept. Dirección de Investigación y Extensión de la Caña de Azúcar. Documento de Internet.
151. Rodríguez, A. 1998. La agricultura cubana a las puertas del siglo XXI. Conferencia magistral. XI Seminario Científico del INCA.
152. Rodríguez, I. 1997. Uso de los residuos de la industria azucarera para beneficio de los retoños de caña de azúcar plantada en Vertisoles. III Encuentro Nacional de Agricultura Orgánica. Resúmenes. UCLV: 10-11.
153. Roggiero, F. Martha.; García, Mirtha.; Cerisola, Cecilia.; Aragón, A. 2001. Retención hídrica en suelos tratados con residuos orgánicos industriales. "Land Farming". XV Congreso Latinoamericano y V Cubano de la Ciencia del Suelo. Centro de Convenciones "Plaza América". 11 al 16 de Noviembre del 2001. Varadero. Cuba. Programa y Resúmenes. p 206.
154. Romanovski, P. O. 1987. Caracterización hidrofísica de un suelo Oscuro plástico no gleyzado. Trabajo de Diploma. CICT.UNICA.
155. Romkems, M.J.M.; Prasad, S.; Whister, F.D. 1990. Surface sealing and infiltration. En: Process Study in Hillslope Hydrology Eds. M.G. Anderson y T. Burt: 127-137.
156. Ruiz Figueroa, J.F.; Morales, H.F.; Martínez, B.F. 1995. Uso de acondicionadores físicos para modificar algunas propiedades físicas de un Vertisol pélico en Jilotepec, Estado de México. Manejo de suelos arcillosos para una Agricultura Sustentable. Universidad Autónoma de Chapingo: 343-350.

157. Ruíz, Magalis; Elizalde, G., Paolini, J. 1997. Características de las sustancias húmicas presentes en microagregados de suelos de dos toposecuencias. [http:// www.redpavfpolar.info.ve / agrotrop.html](http://www.redpavfpolar.info.ve/agrotrop.html).
158. Ruiz, P.M.E., Utset. S.A. 1999. Uso del modelo SWACROP en la estimación de las necesidades hídricas de la papa (*solanum tuberosum* L.) II. Determinación de las propiedades hidráulicas del suelo. *Ciencias Agropecuarias*. V. 8. No. 1: 61-65.
159. Ruiz, P.M.E.; Utset, S.A. 1995. Curva tensión–humedad I: Su determinación e interpretación. *Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 52: 69-72.
160. Salas, E.C.R. 1999. Efectos de la aplicación de vinaza en la producción de caña de azúcar y en las características físico químicas de un Vertisol de Guanacaste. Costa Rica. <http://sii.utt.ucr.ac.cr/publicacion>.
161. Salcedo, P. E. 2000. Alternativas de uso agrícola y forestal de lodos residuales de plantas de tratamiento de aguas negras. Tesis para obtener el grado de maestro en Ciencias de Agroforestería para el desarrollo sostenible. Chapingo. Estado de México: 89p.
162. Salgado, G.S.; Palma, L.D.; Lagunes, L.C.; Carrillo, E.A. 2001. Indicadores de susceptibilidad en los suelos Vertisol y Fluvisol cultivados con caña de azúcar. XV Congreso Latinoamericano y V Cubano de la Ciencia del Suelo. Centro de Convenciones “Plaza América”. 11 al 16 de Noviembre del 2001. Varadero. Cuba. Programa y Resúmenes. p 92.
163. Sánchez, P.S. ; Varona, S.V. 1992. Estudio de la influencia de enmiendas orgánicas y minerales sobre el estado físico del suelo y el rendimiento de la caña de azúcar. Trabajo de Diploma. UNICA.

- 164.Sapochnikou,P.M.; Projorov,A.N. 1990: Modelo de compactación de la capa arable de los suelos por los sistemas de rodaje de la maquinaria agrícola. Pochvovedenie.5: 95-106.
- 165.Schaefer, C.E.; Arands, R.R.; Vandershoot, H.A.; Kosson, D.S. 1997. Modeling of the gaseous diffusion coefficient through unsaturated soil systems. J. Contom. Hydrol, 29 1-21.
- 166.Scholten.T.1997. Hydrology an erodibility of the soil and saprolite cover of the Swaziland Midlevel. Soil Technology 11 3: 247-262.
- 167.Scholten.T; Leinweber, P.; Schnitzer, M. 1998. Structure and surface reaction of soil particles.J.Bufleeds Wiley Chichester, 281.
- 168.Shein, E.V.; Biriozin, P.N.; Kapinos, V.A. 1995. Prácticas de Física de Suelos. Ed. de la Universidad de Moscú, 134 p.
- 169.Skandalariallis, J.; Dantur, N.; Pérez, Z.F. 1995. Aprovechamiento agrícola de los residuos de la agroindustria de la caña de azúcar. Avance Agroindustrial. Diciembre: 38-40.
- 170.Smith,E.D.; Gardner, E.A.; Shaw,R.J.;Coughlan,K.J.; Yule,D.F. 1990. Algunos principios para el manejo de los Vertisoles en los trópicos semi áridos. Memorias del coloquio cubano francés sobre caracterización, funcionamiento hídrico y drenaje de Vertisoles. Bayamo. Cuba.
- 171.Solórzano, P.R. 1998. Fertilidad de suelos y su manejo en la producción agrícola. Revista de Agronomía. Universidad Central de Venezuela. Alcance51: 207p.

172. Stone, L.F.; Márquez, P. 1999. Efeitos do sistema de preparo na compactação do solo; disponibilidade hídrica e comportamento de feijão. Pesquisa Agropecuária Brasileira, 34 1: 83-91.
173. Sulroca, D.F. 1995. Los fertilizantes orgánicos en la agroindustria azucarera. Cañaveral. Revista Trimestral de Información Científico Técnica para los productores cañeros. Enero-Marzo. p 172.
174. Tarawally, M.A.; Frómata, E. 1998. Efecto de la humedad en la compactación del suelo. Ciencias Técnicas Agropecuarias, 71: 83-87.
175. Tisdall, J.M.; Oades, J.M. 1982. Organic matter and water stable aggregates in soil. Journal Soil Science, 322: 141-163.
176. Urbina, C.; Rodríguez, O. 1995. Efecto de dos abonos orgánicos en el control de la erosión y el mejoramiento físico y químico del suelo. Revista de la Facultad de Agronomía. Universidad Central de Venezuela. Alcance 47: 63-74.
177. Vadiunina, A.F., Korcháguina, Z.A. 1986. Métodos de investigación de las propiedades físicas de los suelos. Moscú. 416 p.
178. Veitía, A. 1991. Estudio de la influencia de la vinaza en diluciones en las propiedades agrofísicas de un suelo Oscuro Plástico en el cultivo de la caña de azúcar. Trabajo de Diploma. ISACA. Ciego de Ávila.
179. Vidal, L.; Gutiérrez, A. 1997. Efecto de la aplicación profunda de mejoradores orgánicos y su combinación con el drenaje subsuperficial en los rendimientos agrícolas de la caña de azúcar plantadas en suelos pesados. III Encuentro Nacional de Agricultura Orgánica. UCLV, Resúmenes: 26-27.

180. Villegas, R.; Iznaga, O., Cuéllar, I. 1983. Metodología para el montaje y conducción de experimentos de campo de nutrición y suelos. Dpto. de Suelos y Agroquímica. INICA. 17p.
181. Voronin, A.D. 1984. Física Estructuro funcional. Ed. Universidad de Moscú, 183 p.
182. Voronin, A.D. 1990. Concepción energética del estado físico de los suelos. Pochvedenie, 5: 7-19.
183. Weber, A.1999. Organic Phosphorus. Publicación en línea. Disponible en: <http://www.ar.wroc.pl/weber/fosfor2.html>. Conectado el 30 de Abril de 1999.
184. Yagodin ,B.A.1986. Agroquímica. Editorial MIR. Moscú: 127-128.
185. Yerima, B.P.K.; Wincling,L.P.; Cahoum, F.G.1984. Vertisols in northern of Cameroon: Relationship of select physical and chemical properties. Soil.Soc.Am.J: 267-279.
186. Zimback, C.R.; Cataneo, A.1998. Variabilidad espacial de las características físicas de los suelos. En: Avances en el manejo del suelo y del agua en la ingeniería rural latinoamericana. Ed. Board. Argentina: 132-137.

Anexos

Tabla N°19. Riego tradicional con mezcla de residuos del central y destilería por más de quince años Efecto sobre las propiedades químicas, físico - químicas y los rendimientos de la caña de azúcar.

ZAFR A	PRO F. (m)	BLOQUE	pH		(%)		mg. 100 g ⁻¹ de suelo		cmol (+) . kg ⁻¹					Rendimient os. t . ha ⁻¹
			H ₂ O	KCL	M.O	P ₂ O ₅	K ₂ O	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺	Na ⁺	S	T	
1995	0.00	Tratad o	7.50	6.51	4.21a	5.41 a	20.16 a	50.50 a	18.10 a	4.41 a	2.59 a	75.60 a	76.90 a	52.42 a
	0.20	No Trat.	7.82	6.39	3.90b	4.86b	14.06c	46.21b	16.30b	4.01b	3.06b	69.58b	70.11 b	40.21b
1996	0.20	Tratad o	7.43	6.73	3.95b	4.05b	19.51a b	49.12 a	17.91 a	4.98b	2.41b c	74.42 a	75.42 a	
	0.40	No Trat.	7.75	6.67	2.90c	3.11b c	11.30c d	44.42b c	16.21b	3.86c	2.17c	66.66b	69.17 b	
Es \bar{x}			0.021	0.365	1.993	1.002	3.260	2.187	4.357	0.387	0.913	3.219	0.060	0.168
	0.00	Tratad o	7.52	6.50	4.30 a	5.48 a	21.15 a	49.15 a	18.21 a	4.86 a	2.50b	74.72 a	77.90 a	60.15 a

1996	0.20	No	7.79	6.41	3.92b	4.80b	14.00c	46.05b	15.06b	4.17b	3.18	68.46b	70.21	42.20b
1997		Trat.								a			b	
	0.20	Tratad	7.41	6.70	3.89b	4.17b	20.20b	50.00a	18.42 a	5.06	2.19b	75.67 a	76.96	
	0.40	No	7.73	6.66	2.87c	3.10c	10.98d	44.61b	16.12b	3.70c	2.32b	66.75b	69.92	
		Trat.											b	
Es \bar{x}			1.025	0.984	0.232	0.045	0.578	1.075	3.004	0.165	0.036	1.640	2.004	0.009
	0.00	Tratad	7.79	6.44	4.41	4.22	22.36 a	51.10 a	18.12 a	4.90b	2.31b	76.43 a	79.02	59.36 a
1997	0.20	No	7.72	6.43	3.90b	4.72b	12.91c	46.24b	14.80b	4.20b	3.12	68.36b	70.92	39.31b
1998		Trat.								c	a		b	
	0.20	Tratad	7.50	6.65	3.92b	3.55c	20.93b	51.11 a	18.71 a	5.42	2.20b	77.44 a	79.45	
	0.40	No	7.75	6.70	2.89c	3.08c	10.45d	45.52b	16.09a	3.63c	2.34b	67.58b	69.83	
		Trat.						b					b	
Es \bar{x}			1.045	1.781	0.536	0.042	0.336	2.416	1.110	0.706	0.336	1.905	2.621	0.023

Tabla N°39. Riego tradicional con mezcla de residuos del central y destilería por más de quince años Efecto sobre las propiedades químicas,

físico - químicas y los rendimientos de la caña de azúcar.

ZAFR A	PRO F. (m)	BLOQUE	pH		(%) mg. 100 g ⁻¹ de suelo			cmol (+) . kg ⁻¹					Rendimient os. t . ha ⁻¹		
			H ₂ O	KCL	M.O	P ₂ O ₅	K ₂ O	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺	Na ⁺	S		T	
1995	0.00	Tratad o	7.50	6.51	4.21a	5.41 a	20.16 a	50.50 a	18.10 a	4.41 a	2.59 a	75.60 a	76.90 a	52.42 a	
	0.20	No Trat.	7.82	6.39	3.90b	4.86b	14.06c	46.21b	16.30b	4.01b	3.06b	69.58b	70.11 b	40.21b	
1996	0.20	Tratad o	7.43	6.73	3.95b	4.05b	19.51a	49.12 a	17.91 a	4.98b	2.41b c	74.42 a	75.42 a		
	0.40	No Trat.	7.75	6.67	2.90c	3.11b c	11.30c d	44.42b c	16.21b	3.86c	2.17c	66.66b	69.17 b		
Es \bar{x}			0.021		1.993	1.002	3.260	2.187	4.357	0.387	0.913	3.219	0.060	0.168	
				0.365											
	0.00	Tratad o	7.52	6.50	4.30 a	5.48 a	21.15 a	49.15 a	18.21 a	4.86 a	2.50b	74.72 a	77.90 a	60.15 a	

1996	0.20	No	7.79	6.41	3.92b	4.80b	14.00c	46.05b	15.06b	4.17b	3.18	68.46b	70.21	42.20b
1997		Trat.									a		b	
	0.20	Tratad	7.41	6.70	3.89b	4.17b	20.20b	50.00a	18.42 a	5.06	2.19b	75.67 a	76.96	
		o			c					a			a	
	0.40	No	7.73	6.66	2.87c	3.10c	10.98d	44.61b	16.12b	3.70c	2.32b	66.75b	69.92	
		Trat.											b	
Es \bar{x}			1.025	0.984	0.232	0.045	0.578	1.075	3.004	0.165	0.036	1.640	2.004	0.009
	0.00	Tratad	7.79	6.44	4.41	4.22	22.36 a	51.10 a	18.12 a	4.90b	2.31b	76.43 a	79.02	59.36 a
1997		o			a	a							a	
1997	0.20	No	7.72	6.43	3.90b	4.72b	12.91c	46.24b	14.80b	4.20b	3.12	68.36b	70.92	39.31b
1998		Trat.								c	a		b	
	0.20	Tratad	7.50	6.65	3.92b	3.55c	20.93b	51.11 a	18.71 a	5.42	2.20b	77.44 a	79.45	
		o								a			a	
	0.40	No	7.75	6.70	2.89c	3.08c	10.45d	45.52b	16.09a	3.63c	2.34b	67.58b	69.83	
		Trat.							b				b	
Es \bar{x}			1.045	1.781	0.536	0.042	0.336	2.416	1.110	0.706	0.336	1.905	2.621	0.023