

I. INTRODUCCIÓN:

La caña de azúcar (*Saccharum spp.*) constituye una de las fuentes principales de alimentación para el hombre, además de utilizarse ampliamente los derivados de su proceso industrial. En el mundo 15 000 000 ha están dedicadas a estas plantaciones, siendo los principales países productores Brasil, Pakistán, India, Cuba y Australia (Rossi, 2001).

Los experimentos para la selección de las mejores variedades de caña de azúcar son muy importantes debido a que esto es vital para que el país pueda contar con variedades de buen potencial agrícola e industrial (Hung; *et al.*, 2000) y además de ello, sean una alternativa sostenible frente a los riesgos de cambio climático.

La caña de azúcar por su dulzor es conocida por el ser humano varios milenios a.C., y según descripciones de viajeros a la India 500 años a.C., los habitantes del Valle del Indo la mascaban para obtener su jugo, no obstante conocían el proceso de torcer la caña, y cuajar el guarapo para hacer azúcar. Cuando se descubrió la tumba de Tutankhamon, se sabe que los egipcios también conocían la caña de azúcar. Partiendo de que la caña de azúcar es originaria de la India (algunos investigadores expresan que es oriunda de Nueva Guinea), de la India pasa a China, y después las tropas de Dario al llegar hasta el Río Indo la llevan a Persia, de donde por medio de Marco Polo se expande por Europa. En España la caña hace su entrada por medio de los árabes.

La actividad azucarera en Cuba, comenzó con la introducción de la caña de azúcar por los españoles en 1516, es introducida por Diego Velásquez y la primera variedad fue la llamada “Criolla”, o “De la tierra”, según Acosta (1996). La elaboración y fabricación de azúcar en forma cristalizada comenzó a finales del siglo XVII (Nova, 2000).

La caña de azúcar suministra, en primer lugar, sacarosa para azúcar blanco o moreno. También tiene aproximadamente 40 kg.tm^{-1} de melaza (materia prima para la fabricación del ron). También se pueden sacar unos 150 kg.tm^{-1} de

bagazo. Hay otros aprovechamientos de mucha menor importancia como los compost agrícolas, vinazas, ceras, fibra absorbente, etc.

Uno de los serios problemas planetarios lo constituye el calentamiento global, asociado fundamentalmente a las colosales emanaciones de dióxido de carbono (CO_2), originadas por el empleo de los combustibles fósiles con fines energéticos, principalmente por los grandes consumidores: los países desarrollados sin obviar algunos emergentes incorporados a ello, debido a su impetuoso desarrollo económico.

Atenido a la demostración científica, el carbón mineral (antracita, hulla, lignito), el petróleo y el gas natural son de origen biológico, con períodos de formación entre $15 \cdot 10^6$ años a $460 \cdot 10^6$ años; es decir, que como ciclo normal del carbono en la tierra fue el tiempo en que de forma natural se formaron, lo cual permite puntualizar que el carbono siempre formó parte del planeta y mayormente el aprovechable por los seres vivos como inicio de la cadena alimentaria, se encontraba en la atmósfera en forma de CO_2 en esas épocas. Por la vía de la fotosíntesis de las plantas superiores, algas y otros microorganismos se fijaba como sumidero natural en su biomasa, y por lo que por definición y derecho propio, son biocombustibles también (Gorodnitski, 1979).

Por otro lado los científicos consideran que la Tierra se enfrenta en la actualidad a un periodo de calentamiento rápido atribuido a las actividades humanas, originado por el incremento atmosférico de los niveles de gases que retienen el calor, denominados gases de efecto invernadero o gases invernadero. Los gases de efecto invernadero retienen la energía radiante (calor) proporcionada por el Sol a la Tierra en un proceso denominado efecto invernadero. Estos gases tienen un origen natural y sin ellos el planeta sería demasiado frío para albergar vida tal como la conocemos. Sin embargo, desde el inicio de la Revolución Industrial a mediados del siglo XVIII, las actividades de los seres humanos han añadido más y más gases de este tipo en la atmósfera. Por ejemplo, los niveles de dióxido de carbono, un poderoso gas de efecto invernadero, se han incrementado de manera espectacular desde 1750, principalmente por el uso de combustibles fósiles como

el carbón, el petróleo y el gas natural. Debido a la presencia de una mayor cantidad de gases invernadero, la atmósfera actúa como un manto más espeso que absorbe más calor.

La caña de azúcar constituye una de las plantas de mayor capacidad de conversión de la energía solar en biomasa, dadas sus características de ser una planta del llamado ciclo C4 (Alexander, 1986; Triana, 1991).

Sobre lo anterior la presente investigación se propone la siguiente hipótesis:

Las variedades energéticas de caña de azúcar son una alternativa sostenible ante los riesgos de cambio climático.

Para dar cumplimiento a la hipótesis se proponen los siguientes objetivos:

- Comparar la agroproductividad de las variedades C90-176 y C90-178 con relación a la C90-469.
- Demostrar la factibilidad del empleo de las variedades C90-176 y C90-178 con relación a la C90-469 como alternativas de incremento del CO₂ en el suelo.

II. REVISION BIBLIOGRAFICA:

2.1 PRODUCCION MUNDIAL DE CAÑA DE AZUCAR

Según estimaciones de la FAO, la producción mundial de azúcar en 2007/08 (octubre/septiembre) alcanzó los 169 millones de toneladas (equivalentes a azúcar crudo), un 2,7 por ciento más que el año anterior, y alrededor de 12 millones de toneladas más que el consumo mundial de azúcar, previsto en 157 millones de toneladas. Prácticamente todo el aumento de la producción derivó de los países en desarrollo, que produjeron 128,5 millones de toneladas, frente a los 124,3 millones de toneladas de 2006/07, gracias a una cosecha récord obtenida en la India. Actualmente la producción total de los países desarrollados se pronostica en 40,5 millones de toneladas, un 0,7 por ciento más que el año anterior, debido a los aumentos registrados en Australia y los Estados Unidos.

En la región de América Latina y el Caribe, se sabe que el Brasil produjo sólo 32,2 millones de toneladas de azúcar en 2007/08, volumen relativamente invariado respecto a 2006/07, a pesar de haber obtenido una cosecha récord de caña gracias a unas condiciones atmosféricas relativamente favorables que impulsaron los rendimientos. En efecto, se estima que entre el 54 y 55 por ciento de la producción de caña de azúcar obtenida por el Brasil en 2007/08 se transformó en etanol en vez de azúcar. En México, la producción de azúcar se pronosticó en 5,7 millones de toneladas, lo que representa un aumento del 5,1 por ciento respecto a la campaña 2006/07, afectada por el mal tiempo imperante en el principal estado productor de Veracruz. El aumento previsto en 2007/08 se debe a un ligero incremento de la superficie plantada y a un supuesto retorno a condiciones medias de crecimiento. El reto que enfrenta la industria azucarera de México es el de la total liberalización, a partir de enero de 2008, del comercio de edulcorantes con los Estados Unidos, en el marco del Tratado de Libre Comercio (TLC) de América del Norte. La producción azucarera debería ser mayor en la Argentina, como consecuencia de los aumentos registrados en la superficie plantada y en la capacidad de molturación, a los que contribuyó la devaluación del peso y los

ingresos atractivos obtenidos del azúcar en 2006. También aumentará la producción de azúcar en Colombia, Ecuador, Guatemala y Perú, mientras está previsto un descenso en Cuba, debido a unas condiciones de crecimiento adversas.

En África, la producción total de azúcar puede alcanzar los 10,6 millones de toneladas, 125 000 toneladas (un 1,2 por ciento) más que el año anterior. Mientras en Sudáfrica está previsto un sólido crecimiento de la producción, en Kenya y Mauricio podría descender. En Egipto, la producción es de 1,8 millones de toneladas, volumen ligeramente superior al de 2006/07, siendo la cosecha de remolacha la que absorba la mayor parte del incremento. Para mitigar los problemas creados por los escasos recursos de aguas y tierras, el Gobierno está promoviendo con ahínco la producción de remolacha en vez de caña. Tras dos años de sequía extrema, es probable que en Swazilandia la producción azucarera se recupere sólo marginalmente debido a unas condiciones de crecimiento no tan ideales. También existen aumentos de la producción en Mozambique, el Sudán y la República Unida de Tanzania, estimulados por los planes de expansión que se están ejecutando en previsión de su libre acceso al mercado de la Unión Europea a partir de 2009, en el marco de la iniciativa “Todo Menos Armas”. Etiopía produce alrededor de 360 000 toneladas, el Gobierno ha anunciado planes destinados a quintuplicar la producción azucarera a 1,52 millones de toneladas para 2012/13. En Kenya, la producción de azúcar descendió como consecuencia de dificultades de orden estructural y de malas condiciones atmosféricas.

La producción en Asia se cifra ahora en 68,5 millones de toneladas, un 6,6 por ciento más que en 2007/08, debido principalmente a los fuertes aumentos registrados en la India, China, y Tailandia. La India debería superar al Brasil como mayor productor mundial de azúcar. En China la producción alcanzó los 13 millones de toneladas, alrededor de 700 000 toneladas más que el año anterior, debido principalmente a unas condiciones atmosféricas mejores y a unos precios remunerativos. En Tailandia, la producción azucarera es de alrededor 7,5 millones

de toneladas. Mientras que se prevé una expansión para Indonesia, el Pakistán y Turquía.

En Europa, la producción descendió a 16,8 millones de toneladas, La Unión Europea está tratando de reducir la producción de azúcar en 6 millones de toneladas durante los cuatro años del programa de reestructuración. Según las proyecciones.

Para el caso de Cuba, desde Pinar del Río hasta Holguín y Santiago de Cuba, pasando por Matanzas, Ciego de Avila y Camaguey se encuentran distribuidas las 1'300.000.00 hectáreas del cultivo de caña de azúcar que Cuba dispone para su producción. La temperatura media anual es de 26°C con variaciones desde 10°C en invierno hasta 35°C en verano; la humedad relativa oscila entre 60% y 90% dependiendo de la época del año; el promedio anual de precipitación es de 1.300 mm fluctuando por regiones desde 700 mm hasta 2.000 mm. Su formación vegetal es conocida desde bsT bosque seco tropical hasta el bhT bosque húmedo tropical.

2.2 LA CAÑA DE AZÚCAR COMO FUENTE DE ENERGÍA

Según plantea el experto de la FAO (Best, 1997), los vegetales que se pueden utilizar como combustibles de biomasa pueden ser variedades de árboles de crecimiento rápido, cereales, aceites vegetales, residuos agrícolas o, como en el caso de Brasil y Cuba, la caña de azúcar.

Como toda planta, la caña de azúcar aprovecha su función fotosintética y el agua, para transformar gases de la atmósfera, tales como el dióxido de carbono, CO₂ (considerado como un gas con efecto invernadero), el nitrógeno, N₂ y el hidrógeno, H₂, en oxígeno y en la materia orgánica que conforma la fibra principal de la estructura de la planta: celulosa. Del suelo se toman únicamente minerales y agua, los cuales se reponen por medio de prácticas agronómicamente diseñadas para este cultivo. En ningún momento se destruye materia orgánica proveniente

del suelo. De esta manera el cultivo de la caña contribuye a crear grandes pulmones de áreas verdes renovables cada año (Baldonado, 1997).

El desarrollo vegetativo de la caña absorbe CO₂ de la atmósfera a razón de 55 t/ha para 70 t caña/ha (Oliveira, 1994 y Rozeff, 1994); ello representa alrededor de 42 t biomasa/ha. La combustión de toda esa biomasa vegetal enviaría hacia la atmósfera unas 36 t de CO₂. Es de señalar que el resto del carbono, productor del CO₂, estará presente en el azúcar, las mieles y la cachaza. La generación de este gas a partir de la biomasa no afecta al medio ambiente a causa de producirse un balance con la cantidad que absorbe la planta durante su ciclo vegetativo (Valdés, 1997).

De la cantidad de biomasa producida en las plantaciones de caña de azúcar, los tallos moledores constituyen el 72 %. Esta parte de la planta es llevada a las fábricas con el fin de producir azúcar, proceso en el cual por cada tonelada de tallo se originan 250 kg de bagazo, 45 kg de melaza y 30 kg de cachaza como subproductos. Si esta melaza se destina a la producción de alcohol se obtienen aproximadamente 156 litros de vinaza. Todos estos subproductos son fuentes importantes de materia orgánica, nitrógeno, fósforo, potasio y calcio; su uso racional en algunos suelos relativamente marginales (A3 y A4), podría contribuir a mejorar sus características químicas, físicas y microbiológicas, manteniendo las producciones de caña y azúcar en niveles competitivos (Quintero, 1992).

Una importante ventaja comparativa del azúcar de caña frente a productos alternativos como azúcar de remolacha, glucosa de maíz y jarabe de fructosa, con los que en algunos mercados debe competir, es que aprovechando bien su bagazo puede ser autosuficiente energéticamente y además producir excedente de este material fibroso apto como combustible para la cogeneración de energía eléctrica, o, bien como materia prima para la producción de diferentes subproductos entre los que se destaca la fabricación de diversos tipos de papeles y la producción de tableros aglomerados (Cárdenas et al., 1994).

El bagazo está constituido fundamentalmente por tres elementos fibrosos: la corteza, los haces fibrovasculares y la médula. La relación entre estos tres elementos depende de diversos factores, principalmente la variedad de caña. Investigaciones realizadas sobre las características y contribución de estos tres elementos a las propiedades mecánicas de la pulpa química, encontraron que las fibras de la corteza influyen positivamente en las propiedades de las pulpas de bagazo, especialmente en la resistencia al corte, presentando así el mayor potencial para la producción de papel; por el contrario la presencia de médula acentúa las dificultades en la producción de pulpa de papel (Fernández *et al.*,1995 a).

En Cuba, tradicionalmente el bagazo de caña se ha utilizado como materia prima en la producción de energía, pulpa para el papel, tableros de fibra y partículas de alimento para la ganadería. La calidad de la celulosa que se está obteniendo y la composición de la lignina obtenida en el proceso de delignificación, ofrecen nuevas posibilidades de diversificación dentro del marco de una industria de azúcar de caña integrada. Una gran variedad de productos tales como papeles finos y de usos especiales, láminas filtrantes, productos químicos finos para biotecnología y con fines medicinales tales como las matrices cromatográficas de celulosa, excipientes derivados de celulosa adhesivos y fármacos derivados de la lignina, han sido desarrollados por “Cuba 9”. La disminución de las resinas forestales es evitable si aceptamos la posibilidad de utilización del bagazo u otras fuentes de fibra renovable de buena calidad para estos productos (Fernández *et al.*,1995 b).

En el momento actual, en Cuba, se utiliza el 90 % del bagazo como combustible para producir las energías térmica y eléctrica necesarias al proceso de producción del azúcar; el resto se utiliza para necesidades del proceso tecnológico y para la producción de alimento animal. (Valdés, 1997).

Para Cuba, en correspondencia con las características de las diferentes fábricas de azúcar, se necesita consumir desde 2.0 a 3.0 t de bagazo para producir 1 t de

azúcar crudo y en función de la presión del vapor generado, se puede producir desde 20 hasta 76 kw de energía eléctrica por tonelada de caña molida. Un ahorro de 1 t de bagazo permitiría producir 1 t de azúcar refino sin consumo adicional de combustible; el consumo de energía eléctrica es de alrededor de los 25 a 30 kw-h/t caña molida, luego toda generación superior a estas cifras sería una energía que se puede suministrar a otras fábricas o al sistema eléctrico nacional. Tecnologías existentes indican posibilidades de generación de 100 a 120 kw-h/t caña y otras tecnologías en desarrollo ofrecen cifras entre 200 a 300 kw-h/t caña (Valdés, 1997).

La caña de azúcar es una especie capaz de producir grandes cantidades de materiales lignocelulósicos, lo que hace más versátil, económica e independiente la industria azucarera cubana, y permite afrontar las necesidades de otras producciones de interés para abrir nuevos mercados (González *et al.*, 2001).

2.3 VARIEDADES ENERGETICAS DE CAÑA DE AZUCAR

Las variedades energéticas son individuos F_1 (C90-174, C90-176, C90-178, y Ja54-89) procedentes de cruzamientos entre *Saccharum officinarum* x *Saccharum spontaneum*, que hacen un uso muy eficiente de la energía solar en la producción de biomasa (entre 80 y 150 t/ha/año) lo que constituye una verdadera “plantación energética” que produce combustible sólido que puede ser fácilmente aprovechado y abre una nueva alternativa de energía en el país (Anónimo,1993).

En la década de 1980 las provincias de Ciego de Ávila y Granma recibieron un total de 17 genotipos de caña de azúcar, procedentes del banco de germoplasma nacional, con el objetivo de realizar estudios de estas variedades, y así poder recomendar las que mejores características agroproductivas y de resistencia a las principales plagas y enfermedades brindaran, se hizo énfasis en el contenido de fibra, como característica distintiva para ser empleada como fuente de energía. Fruto de esos estudios se destacaron las variedades C90-176 y C90-178.

Estas variedades presentan las siguientes características:

- Resistencia a plagas y enfermedades.
- Muy rústicas, se desarrollan bien en suelos pobres o de deficiente drenaje interno o salinos.
- Resistente a condiciones adversas de clima (sequía).
- Alto contenido de fibras.
- Aceptable brix.
- Baja humedad.
- Presentan poco meollo.
- Alta producción de biomasa.
- Profusa floración y ahijamiento.
- Buena germinación.
- Producen el doble de materia seca que las variedades comerciales y cinco veces el rendimiento en materia seca que los bosques precoces.

Comparación de la materia seca producida por ha por año de las variedades energéticas con respecto a otros cultivos (Campo, 1997).

| CULTIVO | t de materia seca/ha/año |
|---------------------------|---------------------------------|
| Caña tradicional | 30-82 |
| Maíz (PC) | 8-5 |
| Arroz (PC) | 4-15 |
| Yuca | 8-32 |
| Eucaliptus (ciclo 7 años) | 12 |
| Pino | 10-20 |
| Caña Energética | 50-90 |

(PC): Planta Completa.

Comparación del calor de combustión de las variedades energéticas en Kilocalorías por kilogramo de materia seca, respecto al petróleo y al bagazo.

| MATERIAL | Kcal/Kg |
|-----------------|----------------|
| Petróleo | 10 000 |
| Bagazo | 4 600 |
| Caña energética | 4 800 |

Otras características de las variedades energéticas (Campo, 1993)

- Poseen un calor de combustión similar o ligeramente superior al valor medio del bagazo (4 600 kcal/kg) de variedades comerciales utilizadas para la producción de azúcar.
- Se puede obtener carbón, con el mismo principio con que se hace el tradicional; pero sin respiradero. El carbón obtenido por las cañas energéticas presenta un calor de combustión similar al carbón vegetal tradicional.
- Las variedades energéticas que se han estudiado, han presentado en el mes de febrero con una edad de 12 meses de 25 - 30% de jugo (extracción), de 65 - 70 % de pureza y un 10 % de sacarosa, alrededor de un 35 % de materia seca y entre 20 -26 % de fibra.
- Fue comprobada la resistencia de diferentes variedades a la pudrición de permanecer enterradas por más de 4 meses en condiciones de alta humedad, lo que hace posible el uso de las mismas como tutores de tomate y habichuelas a un costo más bajo que los tutores tradicionales.
- Sobre las características en su contenido de fibra y alta producción de biomasa, y algunos estudios morfológicos y químicos de su bagazo, las variedades energéticas pudieran ser muy atractivas para la fabricación de papel y otros derivados a partir de la ligno- celulosa.

Ventajas que ofrece el empleo de variedades energéticas

- Se pueden plantar en suelos no económicos para otros cultivos, incluso en suelos no aptos para variedades comerciales de caña de azúcar, en los momentos actuales los clasificados como A3 y A4 (marginales) dentro del MINAZ.
- Aportan biomasa abundante y barata, lo que constituye una nueva alternativa de energía renovable como sustituta del petróleo y leña para la industria azucarera.
- Producen cinco o más veces materia seca/ha/año que los bosques de más rápido crecimiento.
- Producen más del doble de la materia seca que las variedades productoras de azúcar.
- Exhiben rendimiento agrícola entre 100 y 150 t/ha/año (118 000 y 177 000 @ /cab/año).
- Por su alta producción y características de sus fibras abren un nuevo camino a la diversificación de la industria azucarera.
- Efecto ecológico inmediato al no contaminar el medio ambiente, conservando bosques, al prescindir del petróleo y la leña.

¿Cómo realizar la siembra de estas variedades?

La siembra se realiza en aquellas zonas marginales que no compiten con las de producción azucarera, pues estas variedades tienen gran poder de adaptación a condiciones difíciles. Se utilizaría para ello las mismas tecnologías de siembra, cultivo y cosecha que para las variedades comerciales actuales.

2.4 CAMBIO CLIMÁTICO

El 90 % de la energía que consumimos para nuestra vida diaria – electricidad, calefacción, transporte – procede de la utilización de combustibles fósiles: carbón,

petróleo y gas natural. La combustión de estos productos de origen orgánico provoca una elevada emisión de gases de efecto invernadero, es decir, gases capaces de evitar que el calor escape de nuestra atmósfera terrestre. Estos gases, principalmente el dióxido de carbono (CO₂), se van acumulando en la atmósfera y, aunque dejan pasar la radiación solar, no permiten, como si de un invernadero se trataran, que el calor generado por el sol sobre la superficie de nuestro planeta pueda disiparse y enfriar la superficie terrestre. Como consecuencia de este efecto invernadero, la temperatura terrestre aumenta progresivamente y esto provoca el cambio climático que estamos experimentando en la actualidad (Moreno, 2007)

El fenómeno del cambio climático se ha denominado a las variaciones en el patrón del clima por la intervención humana. Esta alteración ha modificado el balance de la atmósfera en su capacidad de permitir la radiación mediante el ingreso de los rayos solares y la irradiación con la que se expulsa el calor solar al espacio.

Se ha identificado que la alteración del balance para la radiación y la irradiación atmosférica procede de las modificaciones de los gases denominados gases de efecto invernadero, los cuales intervienen en esos procesos de atrapar y expulsar el calor solar. Los gases de efecto invernadero son principalmente el dióxido de carbono (CO₂), el metano (CH₄), el óxido nitroso (N₂O), los clorofluorocarbonos (CFC), el ozono (O₃) y el vapor de agua. (Villalobos, 2005).

2.5 ABSORCION DE CARBONO POR LAS PLANTAS

El potencial de absorción de carbono mediante actividades de forestación/reforestación depende de la especie, el lugar y el sistema de ordenación y, por consiguiente, es muy variable. Los índices normales de absorción, expresados en toneladas de carbono (tC) por hectárea y año, en el trópico es de 3,2 a 10 tC (Brown, 1996). Los estudios realizados por Houghton *et al.*, (1991) en las regiones tropicales, indican que sería posible absorber un volumen adicional de carbono, que se cifra en 11,5 a 28,7 Gt de carbono mediante la regeneración de unos 217 millones de ha de tierras degradadas.

Tal vez únicamente un tercio de la tierra ecológicamente adecuada podrá destinarse a actividades de forestación/reforestación (Houghton *et al.*, 1991). En esta hipótesis, las actividades agroforestales y de forestación/reforestación absorberían alrededor de 0,25 Gt por año, cifra a la que se añadirían 0,13 Gt anuales gracias a la restauración de tierras degradadas.

Las actividades silvícolas que aumentan la productividad de los ecosistemas forestales, como los aclareos realizados en el momento adecuado, pueden incrementar en cierta medida el almacenamiento de carbono en los bosques. Sin embargo, los efectos de los distintos sistemas silvícolas en la absorción total de carbono son mucho menores que las actividades de forestación y reforestación (Dixon, 1993).

En la naturaleza el carbono se halla por doquier: en el agua bajo la forma de compuestos carbónicos disueltos (los carbonatos), y en el aire como dióxido de carbono. Todos los organismos vivos son compuestos de carbono, que se obtienen como resultado de los procesos metabólicos durante su crecimiento y desarrollo, y que son liberados cuando éstos mueren. Aproximadamente, el 50% del peso seco de cualquier organismo lo constituye este elemento, por lo que es uno de los más importantes de la vida (Smith, 1993).

El ciclo del carbono comienza con la fijación del dióxido de carbono atmosférico a través de los procesos de la fotosíntesis, realizada por las plantas y ciertos microorganismos. En este proceso, el dióxido de carbono y el agua reaccionan para formar carbohidratos y liberar oxígeno en forma simultánea, que pasa a la atmósfera. Parte del carbohidrato (D- (+) glucosa) se consume directamente para suministrar energía a la planta, y el anhídrido carbónico así formado se libera a través de sus hojas o de sus raíces. Otra parte es consumida por los animales, que también respiran y liberan dióxido de carbono. Las plantas y los animales mueren y son finalmente descompuestos por microorganismos del suelo, lo que da como resultado que el carbono de sus tejidos se oxide en anhídrido carbónico y regrese a la atmósfera (Smith, 1993; Schimel, 1995).

III. MATERIALES Y METODOS

3.1 Localidad experimental

El experimento se desarrolló en el bloque experimental de la Empresa Azucarera “Grito de Yara”, ubicada en el municipio de Río Cauto, provincia Granma. Cuba, en un suelo Vertisol pélico gléyico carbonatado, según la Nueva Versión de la Clasificación Genética de los Suelos de Cuba (Hernández *et al.*, 1999), correlacionado con la *Soil Taxonomy* (*Soil Survey Staff*, 2003) como *Typic Haplustert* y con el grupo Vertisoles, según la *World Reference Base* (Driessen *et al.*, 2001).

3.2 Concepción del experimento

El experimento se realizó siguiendo las Normas y Procedimientos del Programa de Mejoramiento Genético de la Caña de Azúcar en Cuba, del Instituto Nacional de Investigaciones de la Caña de Azúcar (INICA, 1987 y 2002).

El experimento se diseñó en un diseño en bloques al azar con cinco réplicas de 48 m² (4 surcos de 7,5 m de largo y 1,60 m de distancia entre surcos). Los tratamientos empleados, fueron las variedades energéticas de caña de azúcar C90-176 y C90-178, empleándose como testigo la variedad comercial obtenida en la provincia de Granma C90-469 (Jorge *et al.*, 2004), todas fruto del programa de mejoramiento genético cubano.

Se seleccionó como material de plantación entrenudos de tres yemas procedentes del Banco de Semilla Básica, con tratamiento térmico y químico. Se plantaron dos entrenudos en el fondo del surco, de forma corrida, garantizándose una población superior al 95% en el experimento. La plantación se realizó en el mes de enero del 2008, cosechándose a los 12 meses como caña planta en enero del 2009 y como primer retoño a la misma edad en enero del 2010.

Las labores fitotécnicas realizadas al experimento, aparte del manejo del agua de riego abordada posteriormente, fueron seis limpiezas y un aporque, todos de forma manual, mientras que la fertilización fue la establecida por el Servicio de

Recomendaciones de Fertilizantes y Enmiendas (SERFE) del Instituto Nacional de Investigaciones de la Caña de Azúcar. Los ciclos evaluados fueron caña planta y primer retoño, mientras que el riego aplicado fue por gravedad con una norma neta parcial de $237 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$, cada 12 días, para garantizar homogeneidad en la brotación.

3.3 Caracteres evaluados

Diámetro del tallo (cm): La lectura se realizó con un Pié de Rey, a los mismos tallos a los cuales se les midió la longitud, colocándolo en el centro del entrenudo ubicado en el tercio medio del tallo. El error de medición fue de 0,1 cm

Longitud del tallo (cm): De cada parcela, ciclo de cosecha, variedad y mes, se midieron todos los tallos molibles de tres plantones seleccionados al azar, de los dos surcos centrales, de las cinco réplicas. La lectura se realizó con una regla graduada en cm, con un margen de error de 0,1 cm desde el suelo, hasta el *dewlap* de la hoja +1, según la clasificación de Kuijper (1915).

Número de tallos por plantón: Se contaron el total de tallos molibles de los mismos plantones que se tomaron a la hora de medir la longitud y el diámetro de los tallos.

Pol en caña (%): Se realizó en el laboratorio con un sacarímetro en el jugo extraído de los tallos de los plantones cosechados para realizarle el cálculo de las t caña. ha^{-1} .

Porcentaje de fibra en caña (%): Una vez extraído el jugo de los tallos muestreados se procedió al cálculo de esta variable siguiendo las normas del INICA (1987 y 2002).

Toneladas de bagazo por hectárea (t bagazo. ha^{-1}): Ídem al porcentaje de fibra en caña.

Rendimiento agrícola (t caña. ha^{-1}): El rendimiento agrícola, se estimó aplicando las fórmulas descritas en las normas del INICA (1987 y 2002), seleccionando tres

plantones representativos al azar de los dos surcos centrales, para evitar el efecto de borde, a los 10 meses de edad, por variedad y réplica en ambos ciclos de cosecha y condiciones de humedad del suelo.

Rendimiento agroindustrial ($t \text{ pol.ha}^{-1}$): El rendimiento agroindustrial se calculó multiplicando el rendimiento agrícola ($t \text{ caña.ha}^{-1}$) por el porcentaje de pol en caña y dividido todo por 100.

Los tallos de todas las variedades y en

todas las réplicas, una vez que fueron molidos y procesados para la extracción del jugo con la finalidad de determinar el porcentaje de pol en caña, se colocaron y distribuyeron uniformemente de acuerdo a la variedad y la réplica en el fondo del surco como material de cobertura vegetal.

3.4 Análisis estadísticos de los datos

El primer paso fue verificar el cumplimiento de las premisas del análisis de varianza: el ajuste a la distribución normal, a través de la prueba de Kolmogorov-Smirnov y la de homogeneidad de las varianzas, aplicando la prueba de Bartlett ($p < 0,05$). Todas las variables evaluadas cumplieron estas dos premisas. Para la descomposición de la variabilidad se empleó un análisis de varianza de clasificación doble de efectos fijos, mientras que para la comparación múltiple de medias se utilizó la prueba de Tukey, con Alfa = 0,05. Se muestran en gráficos de barras, las medias de las variedades o tratamientos, con sus respectivos errores estándar, cuyas unidades de medida coinciden con sus variables correspondientes.

También fue empleada la prueba t de *student* para conocer la existencia o no de diferencias significativas en el contenido de materia orgánica del suelo al inicio de la plantación y a los 24 meses, para cada una de las variedades estudiadas.

IV. RESULTADOS Y DISCUSION

En la figura 1 para la variable diámetro de los tallos en ciclo de caña planta se demostró la existencia de diferencias significativas entre las tres variedades. La variedad C90-469 logró el mayor diámetro de sus tallos frente a las otras 2 variedades, superándolas significativamente, las variedades C90-176 y C90-178, aunque se comportaron significativamente menor que la C90-469, entre ellas no hubo diferencia significativa, con valores promedio muy semejantes.

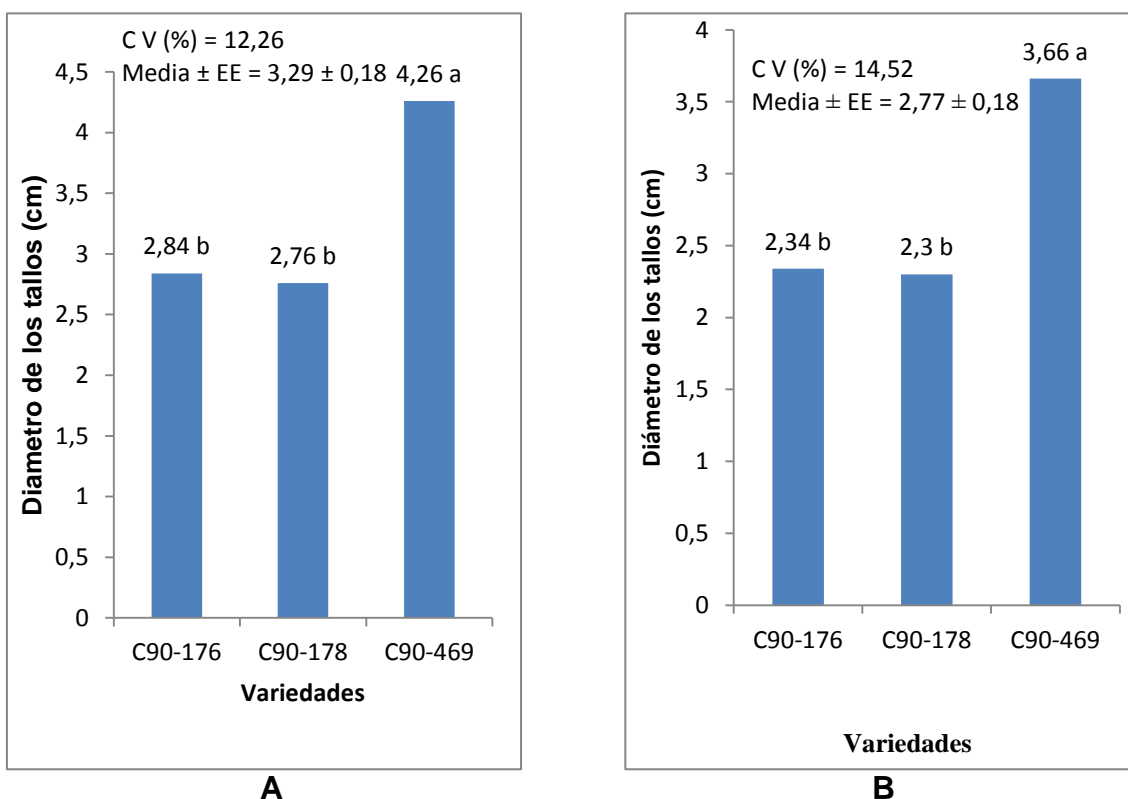


Figura 1. Valores promedio del diámetro de los tallos de las variedades C90-176, C90-178 y C90-469 en ciclo de caña planta a los 12 meses de edad (A) y en primer retoño (B), expresado en centímetros. Letras diferentes indican diferencias significativas al 0,05% de probabilidad empleando Tukey como prueba de comparación múltiple de medias.

Para el caso de primer retoño (B) se demostró que también existieron diferencias significativas, al igual que en caña planta (A), la variedad que mejores resultados logró fue la C90-469, superando significativamente a las variedades C90-176 y C90-178, las mismas que con valores promedio muy similares no presentaron diferencia significativa entre sí.

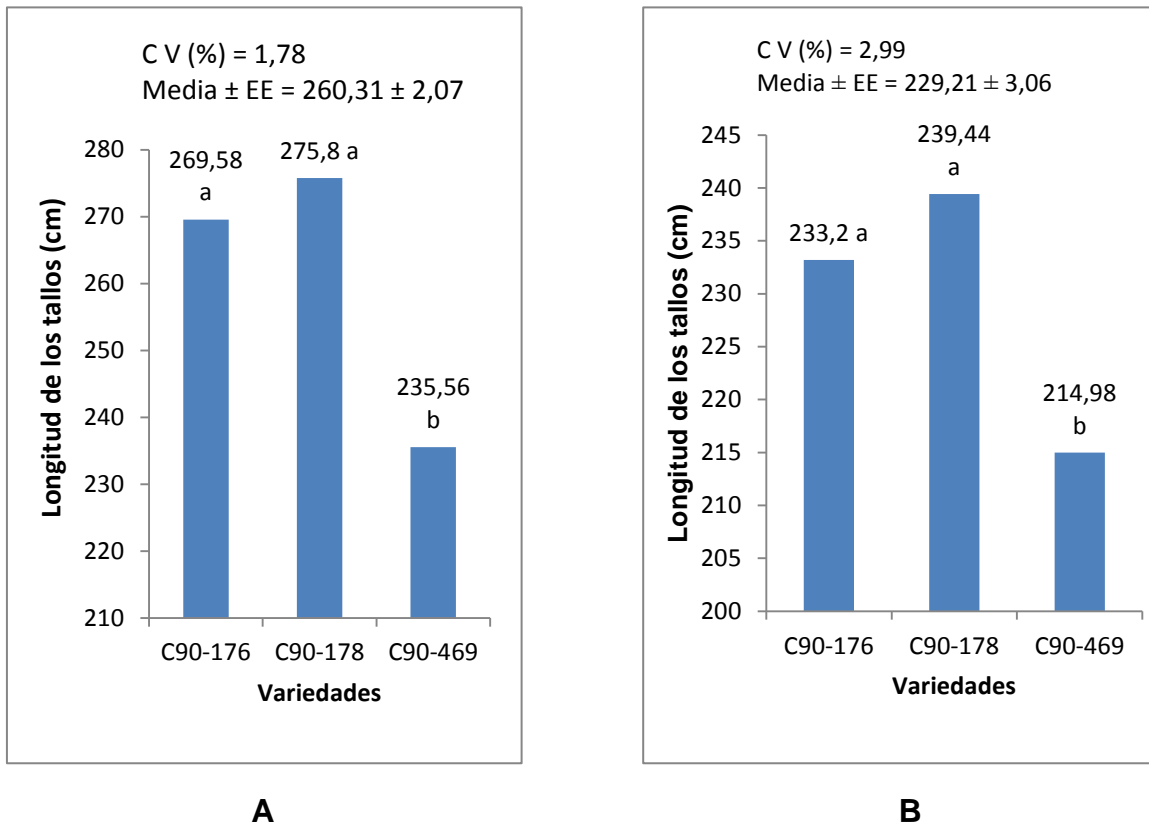


Figura 2. Valores promedio de la longitud de los tallos de las variedades C90-176, C90-178 y C90-469 en ciclo de caña planta a los 12 meses de edad (A) y en primer retoño (B), expresado en centímetros. Letras diferentes indican diferencias significativas al 0,05% de probabilidad empleando Tukey como prueba de comparación múltiple de medias.

En la figura 2 para la variable longitud de los tallos en ciclo de caña planta (A) se demostró la existencia de diferencias significativas entre las tres variedades, al contrario de la variable de diámetro de los tallos, la variedad C90-469 logró la menor longitud de sus tallos frente a las variedades C90-176 y C90-178 las

mismas que superaron significativamente en longitud de sus tallos a la variedad C90-469, aunque se comportaron significativamente mayor que la C90-469, entre ellas no hubo diferencia significativa, con valores promedio muy semejantes. Se determinó así que la longitud de los tallos es inversamente proporcional al diámetro de los tallos. En el caso de primer retoño (B) se determinó la existencia de diferencias significativas, igual que en (A), las variedades que mejores resultados lograron son las C90-176 y C90-178, las mismas que al tener valores promedio muy similares, entre ellas no hubo diferencia significativa, superando en longitud a la variedad C90-469.

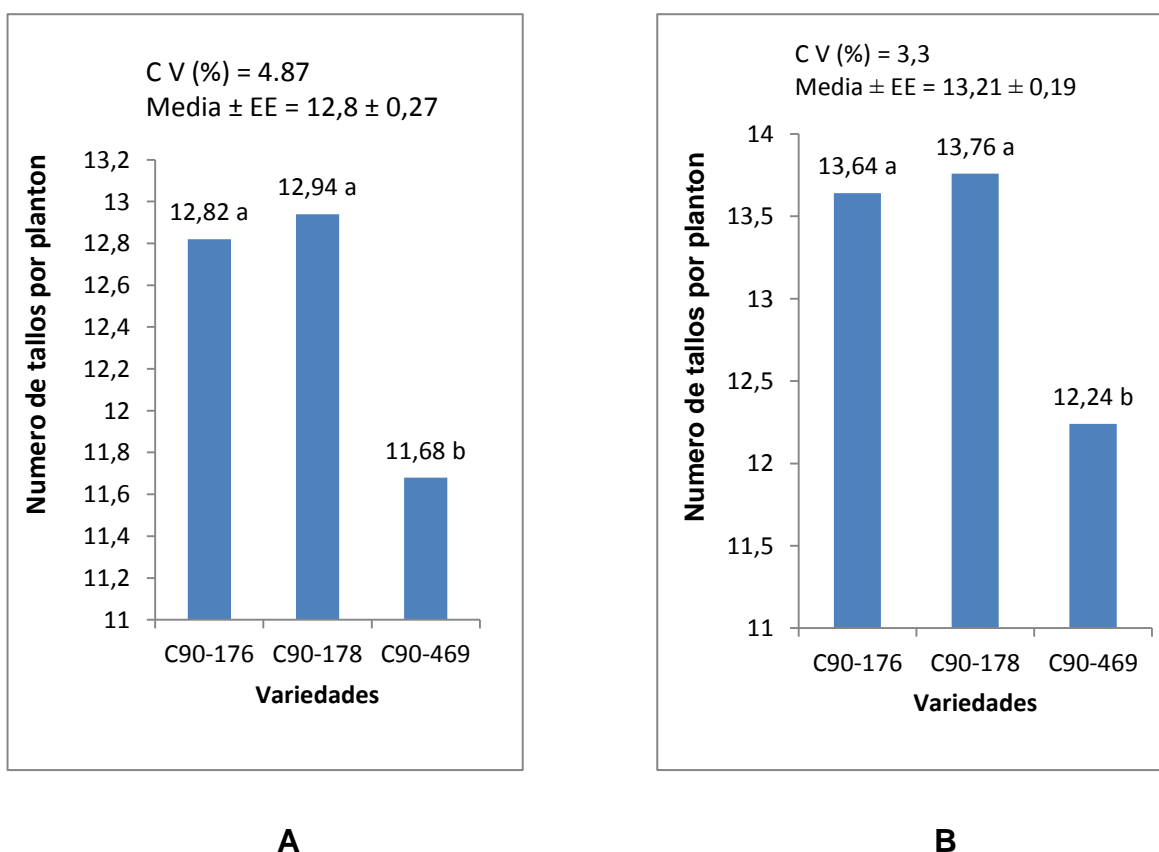


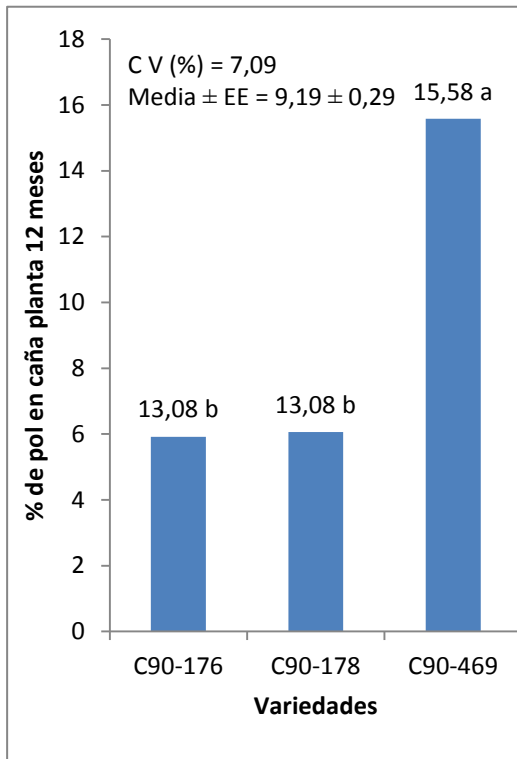
Figura 3. Valores promedio del número de tallos por plantón de las variedades C90-176, C90-178 y C90-469 en ciclo de caña planta a los 12 meses de edad (A) y en primer retoño (B). Letras diferentes indican diferencias significativas al 0,05% de probabilidad empleando Tukey como prueba de comparación múltiple de medias.

Para la variable número de tallos por plantón en caña planta a los 12 meses de edad (A) se determinó que existe diferencias significativas entre las tres variedades, siendo las que mejores resultados lograron las variedades C90-176 y C90-178, las mismas que con valores promedio muy similares entre sí no muestran diferencias significativas, superando al número de tallos por plantón alcanzado por la variedad C90-469. Para primer retoño (B) al igual que en caña planta las variedades que mejor resultados lograron fueron las C90-176 y C90-178 con la ausencia de diferencias significativas entre ellas dado por la similitud en sus valores promedio, superando de esta forma a la variedad C90-469.

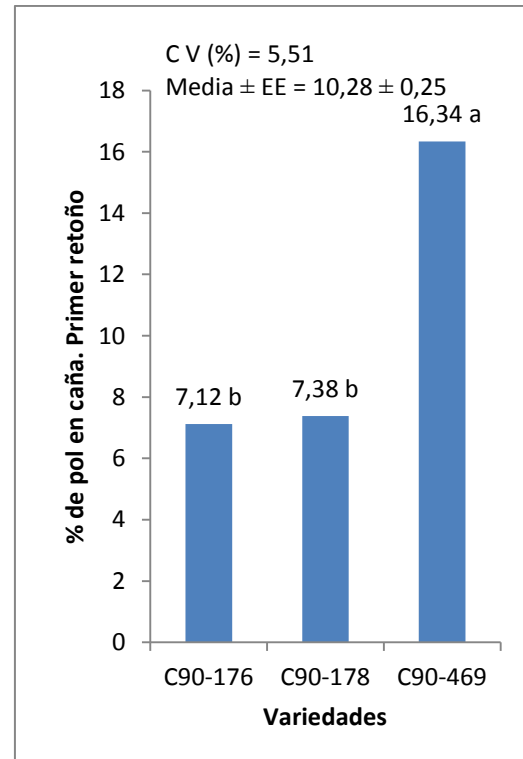
De acuerdo con van Dillewijn (1951), como característica fundamental del gran período de crecimiento en el que se enmarca el crecimiento de los tallos de la caña de azúcar, tres son los procesos que se desarrollan: la división celular, la diferenciación celular y la elongación celular, considerándose que dentro de estos procesos el más afectado por los factores externos, es la elongación celular.

La cantidad de tallos molibles por plantón o ahijamiento, que presentan las variedades de caña de azúcar en el momento de su cosecha determina su rendimiento agroindustrial, por estar altamente correlacionado con el rendimiento agrícola (Tripathi *et al.*, 1982; Milligan *et al.*, 1996 y Rodríguez, 2008). La habilidad de retoñar de las variedades puede ser definido en términos absolutos y relativos (Milligan *et al.*, 1996).

Desde el punto de vista agroproductivo, el tallo es el órgano más importante de la planta de caña de azúcar, ya que en él se almacenan los azúcares. Los tallos representan entre el 50 y el 80% de la biomasa total que existe en una plantación al momento de la cosecha. Por otro lado, el azúcar recuperable producida por unidad de área y de tiempo, es el producto económicamente útil de la caña. La cantidad de esta azúcar depende de la producción de tallos y del contenido de sacarosa en los mismos (Amaya *et al.*, 1995).



A



B

Figura 4. Valores promedio del porcentaje de pol en caña planta de 12 meses de edad de las variedades C90-176, C90-178 y C90-469 (A) y porcentaje de pol en caña primer retoño de las variedades C90-176, C90-178 y C90-469. Letras diferentes indican diferencias significativas al 0,05% de probabilidad empleando Tukey como prueba de comparación múltiple de medias.

Para la variable % de pol en caña planta a los 12 meses de edad (A) se demostró que existen diferencias significativas, la variedad C90-469 es la que mejor resultado logro superando a las variedades C90-176 y C90-178 las que con valores promedio idénticos no demuestran diferencia significativa. Para el % de pol en caña, primer retoño (B) se determinó que también existen diferencias significativas, la variedad que mejor resultado alcanzo fue la C90-469 superando a las variedades C90-176 y C90-178 las cuales no tuvieron diferencia significativa ya que sus valores promedio de porcentaje de pol fueron muy parejos.

Por su parte Inman-Bamber *et al* (2004), destacó que el pol en caña está regulado por los genotipos y las condiciones ambientales, estando la humedad del suelo entre las más importantes.

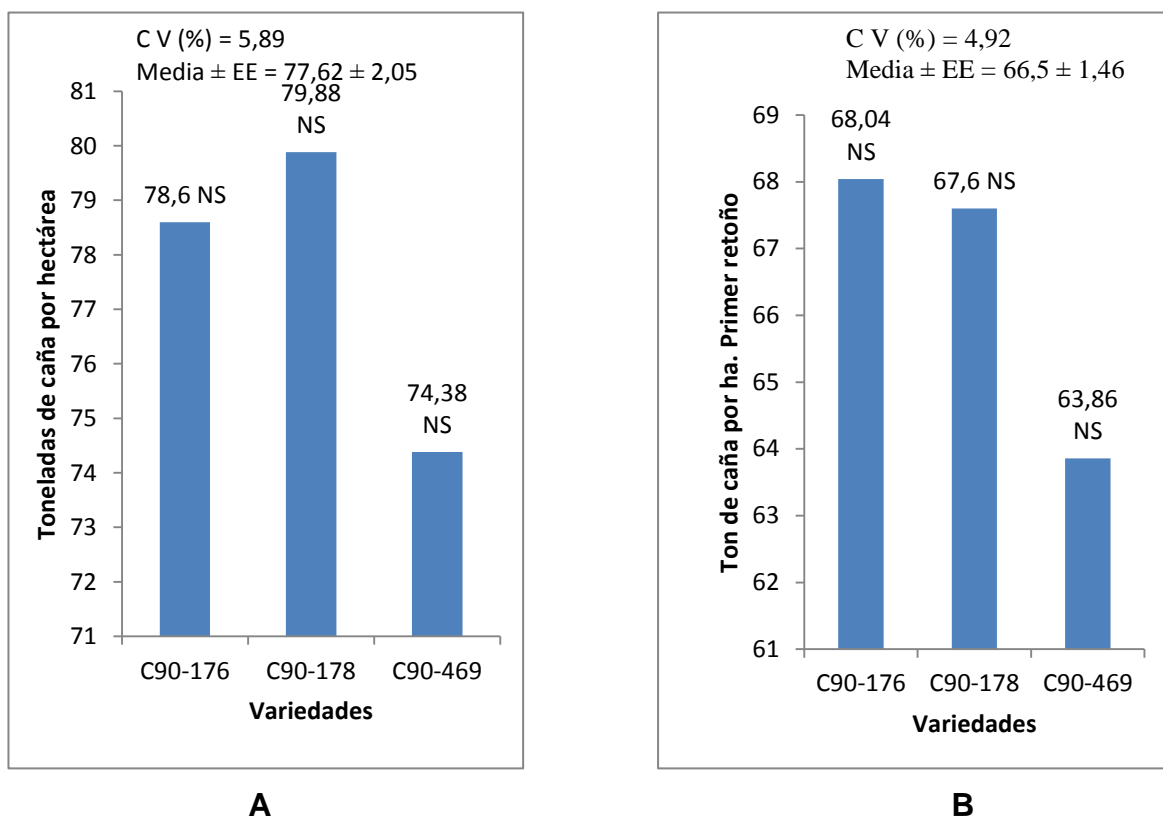
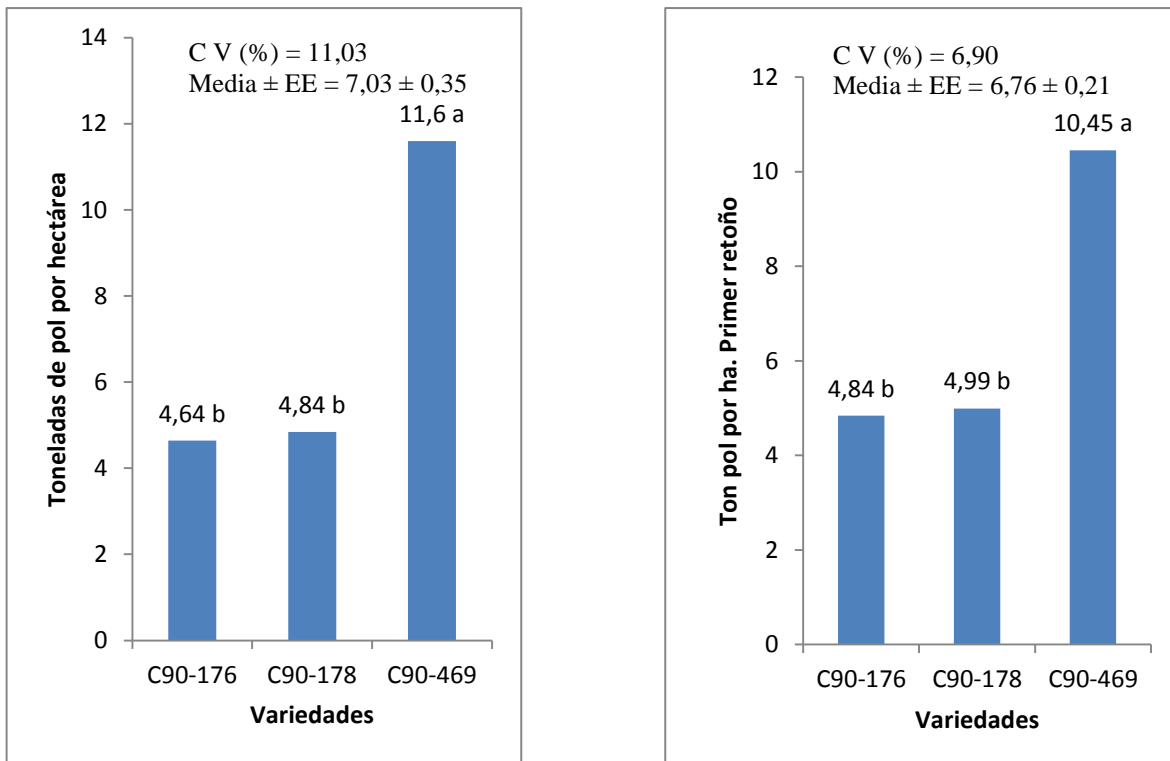


Figura 5. Valores promedio de toneladas de caña por hectárea en caña planta de 12 meses de edad de las variedades C90-176, C90-178 y C90-469 (A) y porcentaje de toneladas de caña por hectárea en el primer retoño (B) de las variedades C90-176, C90-178 y C90-469. Letras iguales indican la ausencia de diferencias significativas al 0,05% de probabilidad.

Tanto para la variable de toneladas de caña por hectárea en ciclo caña planta de 12 meses de edad (A) como para la variable toneladas de caña por hectárea en primer retoño (B) se determinó que no existe diferencias significativas por la similitud de sus valores promedio.



A

B

Figura 6. Valores promedio de toneladas de pol por hectárea de caña planta de 12 meses de edad de las variedades C90-176, C90-178 y C90-469 (A) y toneladas pol por hectárea de caña en el primer retoño (B) de las variedades C90-176, C90-178 y C90-469. Letras diferentes indican diferencias significativas al 0,05% de probabilidad empleando Tukey como prueba de comparación múltiple de medias.

Para la variable toneladas de pol por hectárea en caña planta a los 12 meses de edad (A) se demostró que existen diferencias significativas, la variedad C90-469 es la que mejor resultado logró superando a las variedades C90-176 y C90-178 las que con valores promedio afines no demuestran diferencia significativa. Para toneladas de pol por hectárea en caña, primer retoño (B) se determinó que también existen diferencias significativas, la variedad que mejor resultado alcanzo fue la C90-469 superando a las variedades C90-176 y C90-178 las cuales no

tuvieron diferencia significativa ya que sus valores promedio de toneladas de pol por hectárea son muy parejos.

Las t caña.ha⁻¹ o rendimiento agrícola, mostraron un patrón de respuesta muy similar con relación a las t pol.ha⁻¹, dada la dependencia que el rendimiento agroindustrial tiene del rendimiento agrícola (Castro, 1991 y Rodríguez, 1999; Rodríguez, 2008).

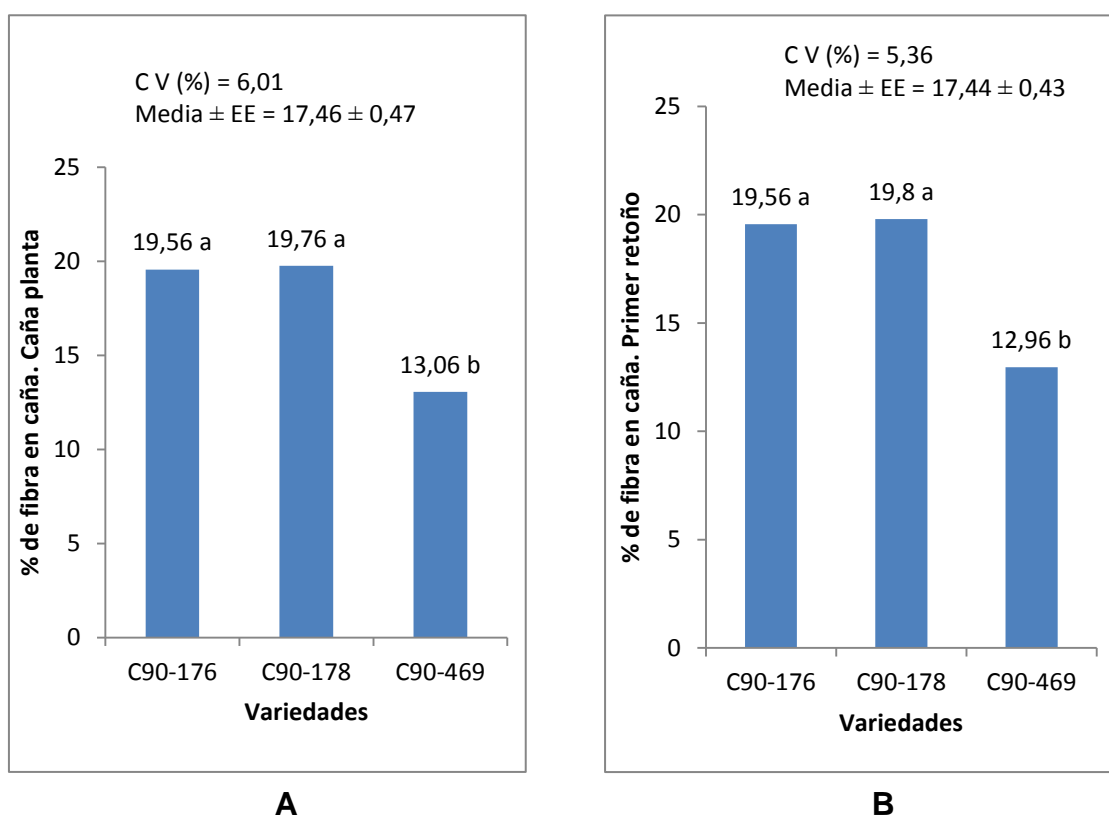


Figura 7. Valores promedio de porcentaje de fibra de caña en ciclo de caña planta de 12 meses de edad de las variedades C90-176, C90-178 y C90-469 (A) y porcentaje de fibra de caña en primer retoño (B) de las variedades C90-176, C90-178 y C90-469. Letras diferentes indican diferencias significativas al 0,05% de probabilidad empleando Tukey como prueba de comparación múltiple de medias.

Para la variable de porcentaje de fibra en caña en ciclo de caña planta de 12 meses de edad (A) se demostró la existencia de diferencias significativas, las

variedades que alcanzaron el mayor porcentaje de fibra son las C90-176 y C90-178, entre ellas no existió diferencia significativa por sus valores promedio tan similares, superando estas 2 variedades a la C90-469. Indistintamente para la variable de porcentaje de fibra en caña en primer retoño (B) en donde también se demostró la existencia de diferencias significativas al igual que en (A) las variedades que mayor porcentaje de fibra alcanzaron fueron la C90-176 y C90-178 superando a la C90-469.

Según Triana y otros (2008) el contenido de fibras de los tallos de las variedades energéticas (75%), es un 10% mayor que el de las variedades azucareras (un 10% menos de meollo). Este alto contenido de fibras, permiten su empleo como fuente fibrosa para las industrias de celulosa y papel, derivados de la celulosa y la lignina, productos aglomerados y la obtención de diferentes productos químicos e industriales. (Abril 2006)

Para la variable toneladas de bagazo de caña por hectárea en ciclo de caña planta (A) se determinó la existencia de diferencias significativas, las variedades que mayor cantidad de bagazo de caña obtuvieron, superando a la variedad C90-469, son la C90-176 y C90-178, entre ellas no existió diferencia significativa por sus valores promedio afines. Igualmente en primer retoño (B) las variedades C90-176 y C90-178 superaron a la C90-469, siendo las 2 primeras las que mejores resultados obtuvieron sin diferencia significativa entre ellas.

El mayor contenido de fibra y por consiguiente mayor producción de bagazo por unidad de superficie que presentaron las variedades C90-176 y C90-178, puede ser consecuencia del mayor diámetro de cada una de las fibras que presentan estas variedades, las cuales según un experimento realizado en la provincia de Sancti Spiritus en el año 2008 en donde se demostró que las fibras de estas variedades energéticas superan en diámetro a las de las variedades azucareras comerciales; pero no así a las fibras de especies maderables, como el Pino (*Pinus Sivestris*), la Haya (*Fagus silvatica*) y el Eucalipto (*Eucaliptos Globolus*). Estos

resultados pueden haber estado influenciados por la existencia de una mayor longitud de las fibras de estas dos variedades, ya que en comparación con maderas duras (Haya y Eucaliptos), presentan longitudes de fibra superiores, pero inferiores a las del Pino. Estas características puede haber influido también en igual proporción en que las variedades C90-176 y C90-178 sus tallos alcanzaran una mayor longitud.

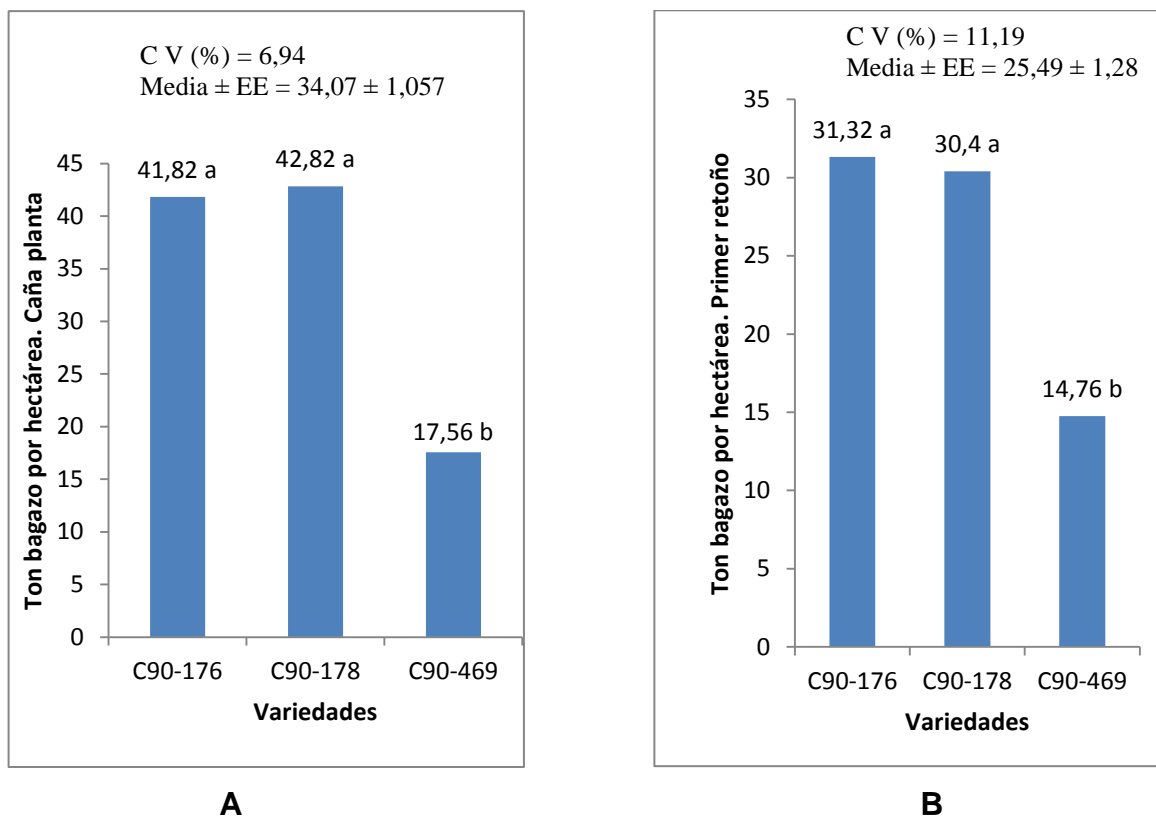


Figura 8. Valores promedio de toneladas de bagazo por hectárea en ciclo de caña planta de 12 meses de edad (A) y toneladas de bagazo por hectárea de caña en primer retoño (B) de las variedades C90-176, C90-178 y C90-469. Letras diferentes indican diferencias significativas al 0,05% de probabilidad empleando Tukey como prueba de comparación múltiple de medias.

Las variedades energéticas al poseer mayor cantidad de bagazo que las azucareras pueden ser utilizadas para la elaboración de tableros aglomerados,

para alimento animal y para producir energía mediante su combustión. Sus características de consistencia, altura y condiciones erectas de los tallos, ha permitido su utilización para sostener erguidas plantaciones hortícolas (Obregón, 2007a).

Esto demuestra la utilidad de su cosecha y procesamiento como biomasa forestal combustible además, según Vera (2007) las variedades C90-176 y C90-178 son hasta el momento las más productivas y resistentes a plagas, enfermedades y sequía.

La alta producción de biomasa en general y por consiguiente de fibras de bagazo que son capaces de producir las variedades consideradas energéticas como la C90-176 y C90-178, puede ser una consecuencia de su alta velocidad de fotosíntesis, que conlleva a una elevada extracción del gas de efecto invernadero CO₂ de la atmósfera, y el consiguiente aporte de oxígeno (O₂) como mecanismo natural de esta actividad biológica utilizando la energía aportada por el Sol (Obregón, 2007a). Por consiguiente su rendimiento alcanza 100 t de materia seca/ha-año, o sea, cinco o más veces más precoz que el más precoz de los bosques energéticos (Vera, 2006), a un costo en las condiciones cubanas de más de dos veces menor que las biomasa forestal, principalmente raleo de los bosques (Rodríguez, 2006).

Para la variable de contenido de materia orgánica en porcentajes se determino la existencia de diferencia significativa, que la variedad C90-176 al momento de la plantación el suelo no tenía un porcentaje alto de materia orgánica y por el contrario a los 24 meses de la plantación de la variedad C90-176 se obtuvo una diferencia significativa de incremento de materia orgánica en el suelo, demostrando que la variedad C90-176 es una variedad que puede realizar un secuestro de carbono de la atmosfera mejor para aportar materia orgánica al suelo disminuyendo el CO₂ de la atmosfera y de esta forma existe una alternativa para compensar el riesgo de cambios climáticos.

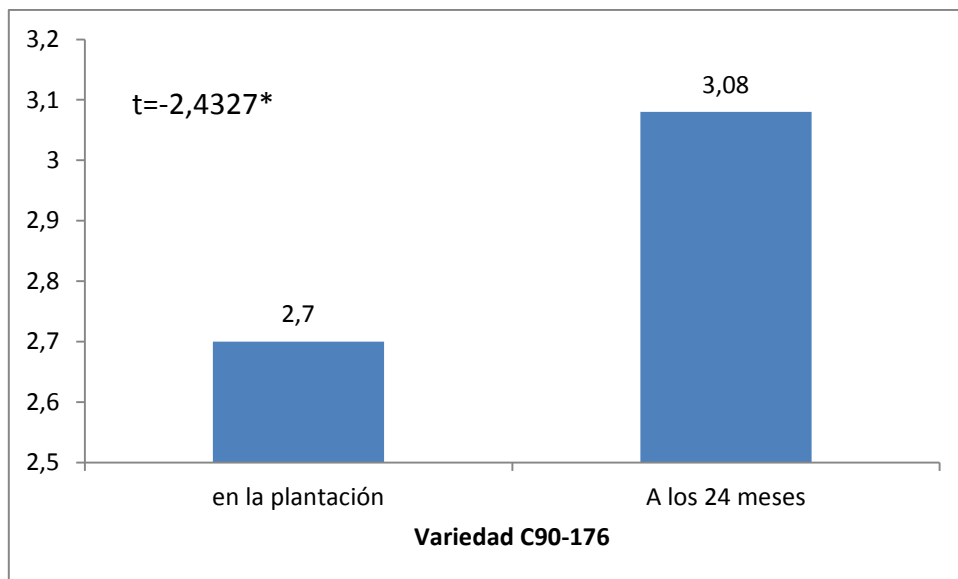


Figura 9. Valores promedio de contenido de materia orgánica en porcentaje en el momento de la plantación en la variedad C90-176 y el valor promedio de contenido de materia orgánica en porcentaje a los 24 meses de la plantación en la variedad C90-176. Nota: * indica diferencias significativas aplicando la prueba t de *student*, para $p < 0,05$.

Según Jordan (1985) Los bosques tropicales contienen gran cantidad de biomasa viviente o materia orgánica, presentan pocas pérdidas de nutrimentos en el tiempo y son ecosistemas de alta productividad en sustratos poco fértiles. De igual forma la variedad de caña C90-176 pueden aumentar la materia orgánica del suelo y demostrar pocas pérdidas de nutrientes.

Es evidente entonces que, desde el punto de vista del cambio climático, es fundamental cultivar biomasa que absorbe el bióxido de carbono de la atmósfera y lo vuelve a liberar una vez quemado. Para la FAO, una de las cosas importantes de la energía de biomasa es que genera empleos. Es una forma de crear infraestructura rural, abre nuevas oportunidades. También tiene un gran potencial para rehabilitar tierras degradadas. Para cualquier tierra degradada, se puede encontrar algún tipo de cultivo que regenere la zona, y ese vegetal, si se utiliza

para obtener energía, tiene un valor agregado. Hace económicamente posible la bonificación de tierras (Best, 1997).

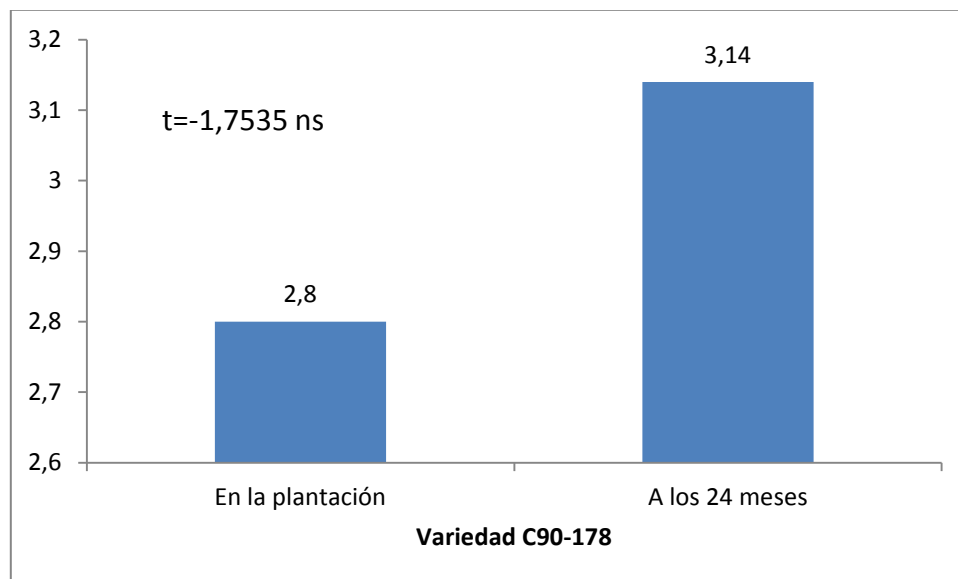


Figura 10. Valores promedio de contenido de materia orgánica en porcentaje en el momento de la plantación en la variedad C90-178 y el valor promedio de contenido de materia orgánica en porcentaje a los 24 meses de la plantación en la variedad C90-178. Nota: ns no existe diferencia significativa aplicando la prueba t de *student*, para $p < 0,05$.

Para la variable de contenido de materia orgánica en porcentajes se determinó la no existencia de diferencias significativas, que la variedad C90-178 al momento de la plantación el suelo no tenía un porcentaje alto de materia orgánica y a los 24 meses de la plantación con la variedad C90-178 se obtuvo como resultado que no hubo un incremento significativo de materia orgánica al suelo, con ello se ha demostrado que la variedad C90-178 es una variedad que puede aportar materia orgánica al suelo a un tiempo de 24 meses y así de esta manera podemos establecer que esta variedad secuestra el CO₂ de la atmósfera para aportar al suelo y con ello contribuimos a evitar en el futuro los cambios climáticos.

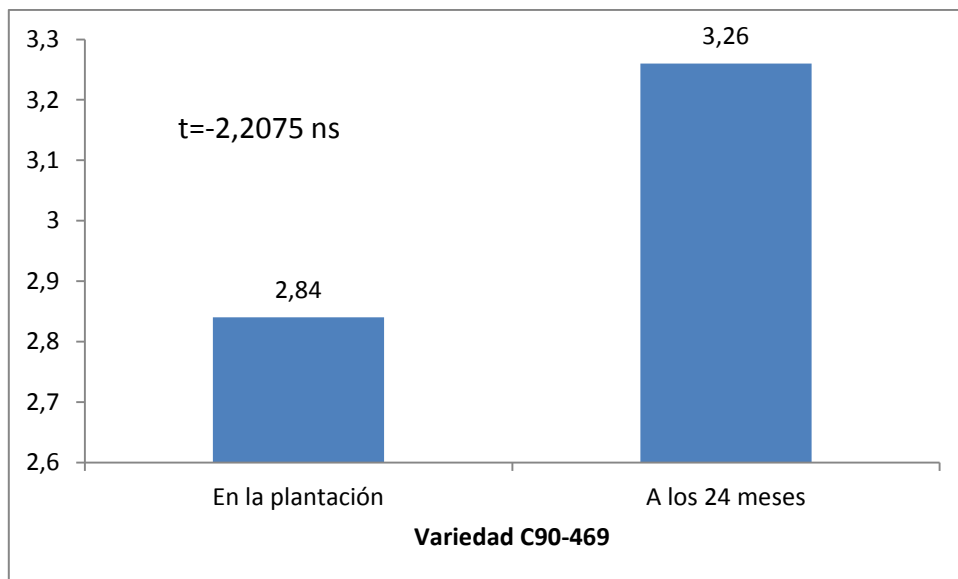


Figura 11. Valores promedio de contenido de materia orgánica en porcentaje en el momento de la plantación en la variedad C90-469 y el valor promedio de contenido de materia orgánica en porcentaje a los 24 meses de la plantación en la variedad C90-469. Nota: ns no existe diferencia significativa aplicando la prueba t de *student*, para $p < 0,05$.

Para la variable de contenido de materia orgánica en porcentajes se determinó que no existen diferencias significativas, que la variedad C90-469 al momento de la plantación el suelo no tenía un porcentaje alto de materia orgánica y a los 24 meses de la plantación con la variedad C90-469 se determinó que de igual condición que la variedad C90-178 como resultado no hubo un incremento significativo de materia orgánica al suelo, con ello se ha demostrado, que la variedad C90-176 es una variedad que puede aportar materia orgánica al suelo a un tiempo de 24 meses mediante secuestro de carbono de la atmósfera por tener propiedades que caracterizan a este tipo de plantas como la de caña de azúcar que es una planta de ciclo C4, así de esta manera podemos establecer que la variedad C90-176 secuestra el CO₂ de la atmósfera en mayor cantidad que las variedades C90-178 y C90-469 para aportar al suelo como materia orgánica y con ello contribuir a evitar riesgos de cambios climáticos en el futuro.

Dentro de las *Poaceas* que pueden tener ciclos de vida de varios años e incluso perennes, se producen importantes cantidades de biomasa subterránea, que tiene una tasa de descomposición relativamente baja si se la compara con la biomasa aérea. Si la plantación se realiza con poca afectación o movimiento del suelo, se puede contribuir al secuestro de importantes cantidades de carbono, siendo significativo lo demostrado por (Baethgen *et al.*, 1994). Este incremento del aporte de carbono fijado al suelo puede ser consecuencia de la disminución de la mineralización de la materia orgánica del suelo y, en segundo término, de la supresión de la erosión de los suelos. Estos dos factores combinados podrían generar, en un plazo de diez años y en las condiciones de Uruguay, sumideros de hasta 15 t C/ha. Asumiendo que en la región se ha adoptado la siembra directa en más de cinco millones de hectáreas desde 1990 (año base del Protocolo de Kyoto), es de esperar que para el año 2010 el secuestro de carbono haya superado los 50 millones de toneladas. Esta cifra representa 1 por ciento del total de reducciones de emisiones de gases acordadas por los países desarrollados (Martino, 2005).

El Cono Sur de América, en función de sus características geográficas, climáticas, económicas y culturales tiene el potencial para ser uno de los mayores sumideros de carbono. En primer término, sus suelos ya han perdido considerables cantidades de carbono por su uso anterior, lo cual implica que existe un potencial ecológico para volver a almacenar una considerable cantidad de carbono. En segundo lugar, es una región con relativamente baja densidad de población y unidades productivas relativamente grandes, lo cual implica una baja presión de los sistemas agrícolas sobre los recursos naturales. Finalmente, es la región del mundo en la cual la siembra directa ha tenido la mayor tasa de adopción, por lo que ya hay un camino andado. El desarrollo del mercado de carbono con participación de los agricultores podría suministrar el estímulo económico para terminar de consolidar el camino hacia una agricultura más sostenible (Martino, 2005).

V. CONCLUSIONES

- Se demostró que las variedades C90-176 y C90-178 no superaron significativamente a la variedad C90-469 en cuanto al rendimiento agroproductivo; pero logran una mayor producción de bagazo por hectárea.
- Se comprobó que la variedad C90-176, incrementó significativamente el CO₂ en el suelo, si se incorporan sus tallos procesados como cobertura vegetal.

VI. RECOMENDACIONES

Fomentar el cultivo de caña de azúcar energética principalmente de la variedad C90-176 por su versatilidad agroecológica.