

# Carta Trimestral

AÑO 32 Nos. 1 Y 2 CALI, COLOMBIA 2010

enero - junio

www.cenicana.org

## TEMAS

### Notas técnicas e informativas

Novedad editorial	2
Alerta fitosanitaria: Roya naranja en el valle del río Cauca	2
Capacitación y transferencia de tecnología en manejo de aguas	4

### Informe especial

Tecnologías de riego para el uso eficiente y sostenible del agua en el sector cañicultor	5
--	---

### Avances de investigación

Riego con caudal reducido	13
Resultados de la primera soca de la prueba regional en zonas secas-semisecas con variedades de las Series 97 al 01	23

### Notas de investigación

Validación de modelos estadísticos multivariados en el proceso de selección de variedades de caña de azúcar. Caso: variedad CC 85-92	40
Maduración y crecimiento de la caña de azúcar	47
Medición experimental y evaluación económica del consumo de combustible en equipos de transporte de caña	55



Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia



Fotografía: Armando Campos Rivera

## Tecnologías de riego para el uso eficiente y sostenible del agua

Con una cultura de más de cien años en el riego por superficie y más de tres décadas de investigación básica y aplicada en el manejo de aguas y suelos, el sector cañicultor del valle del río Cauca es el motor de la innovación tecnológica en la agricultura regional. Su ejemplo es esencial para garantizar el uso racional del recurso hídrico y la promoción de nuevas empresas productivas socialmente responsables. *Pág. 5*

## Riego con caudal reducido

Avances de la investigación cofinanciada por el MADR, Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, para apoyar las iniciativas de desarrollo tecnológico e innovación en la cadena productiva de la caña de azúcar con énfasis en la proposición de alternativas viables que contribuyan a disminuir los efectos del cambio climático en la agricultura. Tecnología de riego por superficie con resultados promisorios en el piedemonte y perspectivas positivas en las zonas planas. *Pág. 13*

## Más información

### Primeros indicios de la roya naranja en Colombia

El 98% del área azucarera tiene variedades resistentes. *Pág. 2*

### Segundo corte de variedades para zonas secas-semisecas

Avances de la prueba regional en seis ingenios. *Pág. 23*

### Modelos estadísticos para la selección de variedades

Validación de metodologías de análisis multivariado. *Pág. 40*

### Maduración y crecimiento de la caña de azúcar

Uso de maduradores. *Pág. 47*

### Menos consumo de combustible en transporte de caña

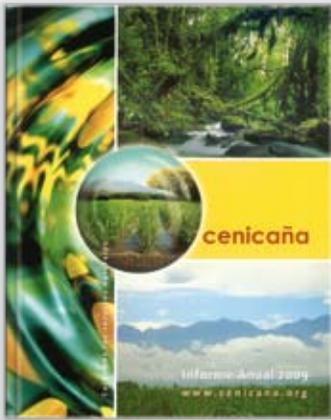
Experimentación. *Pág. 55*

Al cierre de esta edición de la *Carta Trimestral*, se detectó en Colombia la presencia de la roya naranja.

Más información  
[www.cenicana.org](http://www.cenicana.org)

## Novedad editorial

### Informe Anual 2009



Textos completos en  
[www.cenicana.org/publicaciones/index.php](http://www.cenicana.org/publicaciones/index.php)

## Alerta fitosanitaria

### Roya naranja en el valle del río Cauca

En julio de 2010 se detectaron en caña de azúcar en el valle del río Cauca, Colombia, los primeros indicios de la presencia del hongo *Puccinia kuehnii*, agente causal de la enfermedad roya naranja.

Juan Carlos Ángel S., Marcela Cadavid O., Jorge I. Victoria K.\*

En Colombia, en julio de 2010, en semilleros ubicados en predios de la planta Castilla de la empresa Riopaila Castilla (en un lote manejado por Cenicaña mediante contrato de comodato) y en lotes de la prueba regional de variedades de la serie 2001 para las zonas húmedas ubicados en el Ingenio La Cabaña (hacienda Cabaña, suerte 25D), se encontraron en la variedad experimental CC 01-1884 síntomas similares a los de la roya naranja (*Puccinia kuehnii*). Se tomaron muestras de hojas con los síntomas, las cuales fueron comparadas con muestras de la roya café (*Puccinia melanocephala* H. y P. Sydow) en la variedad CC 85-92 mediante análisis visuales y morfológicos con microscopía



óptica convencional. Con base en la descripción morfológica por observación en el microscopio óptico se detectó la presencia del hongo *P. kuehnii* en la variedad CC 01-1884, que luego se confirmó a través de la microscopía electrónica de barrido. Como medida preventiva, la variedad CC 01-1884 fue erradicada de los campos experimentales.

#### Síntomas de roya naranja

El patógeno ha sido registrado en países de Asia y en Australia (antes de 2007), Estados Unidos de América (2007, primer registro en el hemisferio occidental), México, Guatemala, El Salvador, Nicaragua, Costa Rica, Panamá, Cuba (2007-2008) y Brasil (2009).

\* Ingeniero Agrónomo, M.Sc., Fitopatólogo <jcangel@cenicana.org>; Bióloga, M.Sc., Microbióloga Agrícola <mcadavid@cenicana.org>; Ingeniero Agrónomo, Ph.D., Director del Programa de Variedades <jivictoria@cenicana.org>. Todos de Cenicaña.

*Carta Trimestral*

ISSN 0121-0327

Año 32, Nos. 1 y 2 de 2010

Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia  
Dirección postal: Calle 58 Nte. No. 3BN- 110 Cali, Colombia  
Estación Experimental, vía Cali-Florida km 26  
Tel: (57-2) 687 6611 • Fax: 260 7853 • [buzon@cenicana.org](mailto:buzon@cenicana.org)

#### Comité Editorial

Adriana Arenas Calderón • Álvaro Amaya Estévez  
Camilo Isaacs Echeverri • Edgar Fernando Castillo Monroy  
Javier Alí Carbonell González • Jorge Ignacio Victoria Kafure  
Nohra Pérez Castillo • Victoria Carrillo Camacho

#### Servicio de Cooperación Técnica y Transferencia de Tecnología

Coordinación editorial, edición de textos  
y diagramación: Victoria Carrillo C.  
Preprensa e impresión: Feriva S.A., Cali-Colombia

#### Catálogo en línea de la base datos bibliográfica

Consulte las referencias disponibles en  
[www.cenicana.org/biblioteca/catalogo\\_online.php](http://www.cenicana.org/biblioteca/catalogo_online.php)

Solicite los documentos de interés  
a Adriana Arenas <[biblioteca@cenicana.org](mailto:biblioteca@cenicana.org)>  
o visite la biblioteca en la Estación Experimental

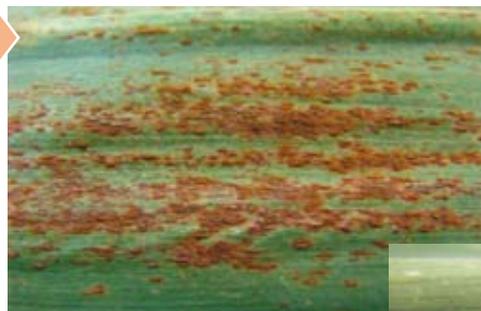


### Síntomas de la roya naranja

Los síntomas de la presencia del hongo *Puccinia kuehnii* se observan principalmente en el envés de las hojas, donde aparecen pequeñas lesiones alargadas de color amarillo pálido. A medida que la infección avanza, las lesiones aumentan de tamaño y adquieren un color anaranjado que luego pasa a ser entre anaranjado y café.



En las hojas afectadas aparecen grupos de pústulas que contienen las esporas del hongo, las cuales tienen una apariencia de polvo anaranjado y son dispersadas por el viento.



Algunas lesiones viejas pueden llegar a ser de color café oscuro.

### Medidas de control

La siembra de variedades de caña resistentes al patógeno es la principal estrategia de control.

En las plantaciones afectadas por roya se recomienda aplicar fertilizantes nitrogenados y riego después de los cinco meses de edad del cultivo, lo cual estimula la producción de nuevo follaje y la recuperación de la planta.

**En Colombia, hasta el momento el 98% del área dedicada a la producción de azúcar se encuentra sembrada con variedades resistentes:**

CC 85-92	CC 84-75	MZC 74-275	CC 87-434
CC 92-2804	CC 92-2198	CC 92-2188	CC 93-4418
CC 93-3826	CC 93-3895	CC 93-4181	CC 93-744
CC 01-1940	CC 01-1228	CC 01-678	CC 00-3079

**Se recomienda a los agricultores vigilar las áreas de cultivo y en caso de encontrar indicios de la enfermedad, avisar de inmediato al departamento técnico del ingenio, donde les informarán los procedimientos que deben seguir.**

## El reto de la adopción de tecnologías de riego

### Acciones de capacitación y transferencia del conocimiento técnico

Con el uso de las tecnologías disponibles actualmente es posible disminuir hasta en 50% el volumen de agua aplicado en cada riego de la caña de azúcar, según las condiciones específicas de los sitios de cultivo. Mediante acciones de capacitación y transferencia del conocimiento técnico, el sector azucarero trabaja unido para sumar voluntades comprometidas con este noble propósito: usar el agua y los demás recursos asociados al riego de un modo más eficiente y sostenible.

Más de mil personas de la agroindustria azucarera colombiana han participado en los tres últimos años en los programas de capacitación y transferencia de tecnología organizados por el sector para promover la adopción de prácticas sostenibles en el manejo del recurso hídrico en las unidades productivas de caña de azúcar ubicadas en el valle del río Cauca.

Ahorros de agua y volúmenes aplicados con el uso de tecnologías de riego*	Un riego (m <sup>3</sup> /ha)	Cuatro riegos, con BH** (m <sup>3</sup> /ha)	Siete riegos, sin BH** (m <sup>3</sup> /ha)
Volumen de agua aplicado en cada riego sin adoptar ninguna de las tecnologías	1,800	7,200	12,600
<i>Ahorro de agua mínimo si adopta el <b>Control administrativo del riego</b></i>	200	800	1400
Volumen de agua aplicado después de adoptar el Control Administrativo del Riego (CAR)	1,600	6,400	11,200
<i>Ahorro de agua mínimo si adopta el <b>Riego por surco alterno</b></i>	300	1200	2100
Volumen de agua aplicado después de adoptar CAR y surco alterno	1,300	5,200	9,100
<i>Ahorro de agua mínimo si instala <b>Tubería con compuertas</b></i>	200	800	1400
Volumen de agua aplicado después de adoptar CAR, surco alterno y tubería con compuertas***	1,100	4,400	7,700
<i>Ahorro de agua mínimo si adopta el <b>Riego por pulsos</b></i>	200	800	1400
Volumen de agua aplicado después de adoptar CAR, surco alterno, tubería compuertas y pulsos	900	3,600	6,300

\* Valores estimados en investigaciones de Cenicaña en cooperación con ingenios y cultivadores de caña.

\*\* BH: Balance hídrico (para programación de los riegos). Permite ahorrar en promedio tres riegos por año.

\*\*\* Valores alcanzados en el Ingenio Manuelita S.A.

**Red GTT**  
Programa de eventos, memorias y estudios de adopción  
<[www.cenicana.org/investigacion/sctt/red\\_gtt.php](http://www.cenicana.org/investigacion/sctt/red_gtt.php)>

**Asociación de Cultivadores de Caña de Azúcar de Colombia**  
<[www.asocana.org](http://www.asocana.org)>

**Oferta de programas de capacitación y formación**  
<[www.tecnicana.org](http://www.tecnicana.org)>

- ▶ Durante el período comprendido entre octubre de 2001 y junio de 2010, el 80% de los cultivadores de caña de la Red de Grupos de Transferencia de Tecnología (GTT), integrada por 930 proveedores de la materia prima de once ingenios azucareros que tienen influencia en el 95% del área sembrada con caña en el valle del río Cauca, participaron en 59 eventos de transferencia de tecnología sobre manejo de aguas. La Red GTT es una iniciativa del Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia (Cenicaña) que cuenta con el respaldo de los ingenios azucareros y los cultivadores de caña.
- ▶ En 2008, con el auspicio de la Asociación de Cultivadores de Caña de Azúcar de Colombia (Asocaña) y el Servicio Nacional de Aprendizaje (Sena), se desarrolló el programa de capacitación "Optimización del recurso hídrico" compuesto por cinco cursos a los que asistieron 73 ingenieros, y once cursos en los que participaron 250 mayordomos y supervisores responsables del manejo de aguas en los ingenios azucareros y las fincas proveedoras de caña. La Asociación Colombiana de Técnicos de la Caña de Azúcar (Tecnicaña) intervino como operador logístico y Cenicaña, como coordinador académico-metodológico y agente de capacitación.
- ▶ En 2009 y 2010, con el apoyo de los ingenios Manuelita, María Luisa, Mayagüez, Providencia, Pichichí y Riopaila Castilla un total de 90 mayordomos de estas empresas asistieron al curso "Manejo eficiente del recurso hídrico" organizado por Tecnicaña. El programa académico fue formulado por Cenicaña, entidad que además apoyó la formación de los capacitadores.

# Tecnologías de riego para el uso eficiente y sostenible del agua en el sector cañicultor

José Ricardo Cruz Valderrama\*

En el valle del río Cauca en los últimos años se ha agudizado la escasez de agua para el consumo humano, agrícola e industrial debido a la demanda creciente del recurso y al efecto del cambio climático que se manifiesta por el aumento de la frecuencia con que ocurren los fenómenos de El Niño y La Niña, anomalías que alteran la cantidad acostumbrada de lluvia y su periodicidad.

Un ejemplo de ello es la sequía prolongada que ocurrió entre junio de 2009 y marzo de 2010 cuando el fenómeno de El Niño, causado por el aumento de la temperatura superficial del mar en el océano Pacífico tropical, hizo que en el valle del río Cauca disminuyeran los caudales de las aguas superficiales en más del 50% y de las fuentes de agua subterránea entre 20-40%. Esta sequía, que se extendió por más de diez meses, demostró la necesidad urgente de hacer un uso más eficiente del agua que contribuya efectivamente a la sostenibilidad del recurso hídrico en la región.

Para el efecto, el sector agroindustrial de la caña de azúcar cuenta actualmente con tecnologías de riego que han sido desarrolladas y adaptadas por Cenicaña en cooperación con los ingenios azucareros y los cultivadores de caña. Las tecnologías disponibles se basan en las necesidades de desarrollo tecnológico planteadas por los propios cañicultores de acuerdo con la problemática del agua en la región, donde se tiene una cultura de más de cien años en el riego por superficie.

Recientemente y como un complemento de las estrategias de investigación y transferencia tecnológica, a principios de 2010 el sector azucarero constituyó la Mesa del Agua, mecanismo de concertación de los compromisos sectoriales en relación con el establecimiento de acciones que busquen el uso racional y sostenible del recurso hídrico. Como resultado parcial de esta iniciativa se tienen recomendaciones para el corto, el mediano y el largo plazo. Entre los propósitos de corto plazo se trabaja en la definición de metas de reducción de uso del agua mediante el incremento de la adopción de las tecnologías disponibles, de modo que se están ajustando los indicadores respectivos para implementar las mediciones del caso en la totalidad del área en cultivo donde se aplica riego.

\* Ingeniero Agrícola, M.Sc., Ingeniero de Suelos y Aguas de Cenicaña <jrcruz@cenicana.org>

A continuación se presentan los aspectos más relevantes acerca de las tecnologías de riego recomendadas por Cenicaña para el cultivo de la caña de azúcar en el valle del río Cauca, las cuales difieren en su grado de adaptación según las condiciones propias de cada sitio dedicado a la producción agroindustrial.



## Balance hídrico para la programación de los riegos

El balance hídrico es una contabilidad del agua en el suelo que se constituye en una herramienta muy eficaz para la programación oportuna de los riegos en el cultivo de la caña de azúcar. Las experiencias con el uso de esta metodología en el valle del río Cauca demuestran que es posible reducir el número de riegos aplicados por año en un valor promedio de tres riegos, lo cual representa un ahorro de agua entre 4000-5000 metros cúbicos por hectárea y por año ( $m^3/ha$  por año), que en un área de 110 mil hectáreas equivale a un ahorro de agua de 495 millones de  $m^3/año$ .

La confiabilidad del balance hídrico depende de la precisión con que se determinen la lámina de agua rápidamente aprovechable del suelo (LARA), la precipitación y la evaporación, y del buen juicio de las personas responsables del riego para realizar los ajustes requeridos por la metodología de acuerdo con las condiciones del sitio de cultivo y la plantación.

Para la programación de los riegos por balance hídrico Cenicaña ha desarrollado dos herramientas que se encuentran disponibles para los cultivadores de caña y además ofrece los servicios de capacitación requeridos para su implementación. Las herramientas disponibles son el programa de balance hídrico por computador (BH v.3.0) y el tanque Cenirrómetro.

El tanque Cenirrómetro (Torres y Cruz, 1995) es una opción manual que permite calcular el balance hídrico diario o semanal para decidir, por inspección visual del nivel del agua en un recipiente plástico, el momento oportuno del riego.

Contáctenos para recibir capacitación  
en el uso de las herramientas  
de balance hídrico  
**Servicio de Cooperación Técnica  
y Transferencia de Tecnología**  
<[admin\\_web@cenicana.org](mailto:admin_web@cenicana.org)>

El Cenirrómetro es un recipiente plástico de forma cilíndrica y color claro (diámetro de 26-30 cm y altura de 35-40 cm) que tiene definida la capacidad máxima de almacenamiento de agua rápidamente aprovechable (LARA) de acuerdo con la textura del suelo y marcas de referencia que indican el momento oportuno del riego según la edad del cultivo.

## Programa de balance hídrico por computador (BH v.3.0)

Software desarrollado para calcular el balance hídrico en el suelo en un momento dado, según el cual se pueden programar los riegos de la caña de azúcar de acuerdo con la edad del cultivo. Para la contabilidad se requieren tres datos clave: (1) Valor de la LARA o lámina de agua rápidamente aprovechable del suelo; (2) Valor de la precipitación diaria; (3) Valor de la evaporación diaria.

**El orden de prioridad para la programación de los riegos** ha sido definido con base en resultados experimentales (aparte de los riegos de germinación y acompañamiento de la fertilización), así: (1) Plantillas que tengan entre 4 y 8 meses de edad; (2) Socas entre 4 y 8 meses; (3) Plantillas entre 8 y 10 meses; (4) Socas entre 8 y 10 meses; (5) Plantillas entre 2 y 4 meses; (6) Socas entre 2 y 4 meses de edad.

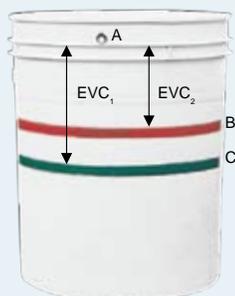
**Para la obtención del valor de la LARA se recomienda** determinar las constantes de humedad del suelo preferiblemente en el campo de cultivo y para cada consociación de suelo, de modo que se cuente con datos confiables acerca del Punto de Marchitez Permanente (PMP), la Capacidad de Campo (CC) y la Densidad Aparente (Da), los cuales se utilizan en la fórmula de cálculo de la LARA de cada suelo (Torres, Cruz y Villegas, 2004). Sin embargo, mientras se obtienen los valores reales de la LARA en los sitios de cultivo, se puede iniciar el balance hídrico utilizando los valores estimados por Cenicaña con base en los estudios detallados de los suelos realizados en el valle del río Cauca, con la advertencia de que se deben ajustar dichos valores mediante las determinaciones de campo (ver tabla de referencia de LARA en la página 8 siguiente).

**En cuanto a la precipitación**, a fin de garantizar que el registro sea confiable para cada una de las suertes, se debe contar con el número adecuado de pluviómetros distribuidos de forma correcta según el área, así: Uno a dos pluviómetros en áreas hasta de 50 ha; tres pluviómetros en áreas entre 51-100 ha; cuatro pluviómetros en áreas entre 101-200 ha; cinco pluviómetros en áreas entre 201-300 ha; en áreas >300 ha se deben instalar cinco pluviómetros por las primeras 300 ha y sumar uno por cada 100 ha adicionales.

**Los registros de la evaporación se pueden obtener** mediante consultas al boletín de la Red Meteorológica Automatizada (RMA) que se actualiza a diario en el sitio web de Cenicaña. Para la consulta debe identificar la estación meteorológica de influencia en la suerte de interés.

Identifique la estación meteorológica de la RMA de influencia en su finca y revise a diario los datos de evaporación

El tanque Cenirrómetro se calibra para suelos de texturas liviana, mediana o pesada.



**EVC1:** Altura desde el orificio vertedero hasta la marca de referencia para el riego en cañas entre 2 y 4 meses.

**EVC2:** Altura desde el orificio vertedero hasta la marca de referencia para el riego en cañas entre 4 y 10 meses.

**A:** Orificio vertedero.

**B:** Marca de control para cañas entre 4 y 10 meses.

**C:** Marca de control para cañas entre 2 y 4 meses.



El software BH v.3.0 se puede descargar del sitio web de Cenicaña

[www.cenicana.org/investigacion/agronomia/manejo\\_aguas.php](http://www.cenicana.org/investigacion/agronomia/manejo_aguas.php)

Además se puede adquirir en las oficinas de Cenicaña en Cali y en la Estación Experimental

Consulte la Serie Técnica No.33

[www.cenicana.org/publicaciones/index.php](http://www.cenicana.org/publicaciones/index.php)



Instale sus propios pluviómetros y registre la precipitación diaria

Solicite su clave de usuario del sitio web de Cenicaña, ingrese al Servidor de Mapas, seleccione Ingenio-Hacienda y consulte los mapas temáticos de "Climatología"

[www.cenicana.org/aeps/index.php](http://www.cenicana.org/aeps/index.php)

Todos los días revise los datos de evaporación en el boletín de la RMA

[www.cenicana.org/clima/\\_boletin\\_meteoro\\_diario.php](http://www.cenicana.org/clima/_boletin_meteoro_diario.php)

Tabla de referencia de la lámina de agua rápidamente aprovechable (LARA) estimada según la edad del cultivo para los 71 suelos más representativos del valle del río Cauca (142,947 ha) con base en estudios detallados de suelos\*

Suelo	LARA (mm)		Suelo	LARA (mm)		Suelo	LARA (mm)	
	2-4 meses	4-10 meses		2-4 meses	4-10 meses		2-4 meses	4-10 meses
Argelia	50	60	Franciscano	49	64	Palmira	50	70
Arroyo	49	76	Galpón	54	71	Palmirita	50	70
Asombro	50	74	Guabito	56	64	Palmito	61	72
Ballesteros	58	72	Guadual	51	71	Piedras	51	71
Burriá	56	78	Guayabo	69	84	Pindo	58	80
Cachimbalito	59	78	Inés	65	89	Potoco	76	109
Caloto	52	75	Isabela	58	75	Potreriillo	52	80
Canaima	69	79	Jamundí	64	91	Puente Esclavos	53	82
Cantarina	58	80	Japiogrande	67	86	Quinamayó	49	80
Cañas	55	72	Jordán	49	88	Río de Janeiro	50	66
Castillo	52	71	Juanchito	54	67	Río Teta	52	74
Catorce	52	81	La Luisa	65	75	Rita	56	72
Ceibal	50	74	La Suiza	53	72	Samán	47	87
Chontaduro	55	72	Loma	45	70	San Nicolás	58	79
Ciénaga Honda	54	71	Lomitas	48	62	Sillero	65	90
Corintias	55	79	Machín	55	73	Taula	69	94
Corinto	56	79	Manuelita	55	75	Tifton	50	66
Corozo	62	81	Margarita	56	78	Timba	54	73
Cuprecia	51	91	Mico Armel	51	72	Tortugas	52	84
Delicias	57	75	Naranjos	49	68	Troja	51	74
Desbaratado	50	86	Nima	45	60	Victoria	54	69
Egipto	65	78	Nuevo Pichichí	41	62	Vista Hermosa	67	85
Escocia	58	79	Palmeras	53	76	Zanjón Cochinito	61	84
Esneida	50	70	Palmiche	54	72			

\* Los datos que aparecen en esta tabla son una referencia de la LARA en cada suelo y pueden ser utilizados para iniciar el balance hídrico. No obstante, la recomendación de Cenicaña es que cada agricultor haga las determinaciones de campo directamente en su predio para obtener la LARA de cada consociación de suelo.



*El aforador RBC es una estructura precisa, fácil de construir y de costo relativamente bajo*

### Aforador RBC para la medición del agua de riego

El aforador RBC corresponde a un vertedero de cresta larga, con rampa en la entrada para facilitar el flujo de sedimentos con el agua, que deriva su nombre de la primera letra del apellido de los investigadores que lo calibraron en laboratorio: John A. **R**eplogle, Marinus G. **B**os y Albert J. **C**lemmens.

De acuerdo con las evaluaciones realizadas por Cenicaña (Torres y Cruz, 1993), el aforador RBC presenta ventajas con respecto a otras estructuras de aforo en cuanto a la facilidad de instalación, la economía de costos en la construcción y la precisión en los caudales medidos (entre 0.002-3.0 m<sup>3</sup>/s). En canales secundarios de 200-600 L/s el costo del aforador RBC puede ser el 20% del costo de otros aforadores como las canaletas sin cuello o la Parshall, y en canales primarios (>600 L/s) el costo del RBC representa entre 40-50% del costo de otros aforadores.

Cenicaña tiene disponibles los planos de diseño de una canaleta RBC portátil para medir el agua directamente en los surcos, la cual debe ser utilizada en cada frente de riego. Además presta el servicio de diseño y calibración de aforadores RBC para ser construidos en canales secundarios o primarios.

A partir del 2010 las autoridades ambientales exigen la medición del agua con registro continuo, para lo cual se está desarrollando un equipo electrónico que pueda ser utilizado para el efecto y con un costo significativamente inferior al que tienen los equipos disponibles actualmente en el mercado; con este criterio se están evaluando en campo seis equipos diseñados con base en tres tipos de sensores: ultrasonido, resistivo y de presión (dos equipos por cada tipo de sensor).



Canaleta RBC portátil

## Control administrativo del riego asistido por computador

El control administrativo del riego es una metodología que permite obtener información acerca del volumen de agua utilizado en el riego, la eficiencia de aplicación, el rendimiento de la operación, la eficiencia administrativa y los demás parámetros de ejecución del riego, a partir de la cual se pueden tomar medidas correctivas sobre la marcha e implementar programas de adecuación, construcción de obras hidráulicas, desarrollo de aguas y capacitación del personal involucrado en la labor.

Para el registro de los datos que se obtienen directamente en los frentes de riego y el cálculo de los indicadores de gestión se cuenta con una hoja electrónica (Microsoft® Office Excel) disponible para los cultivadores donantes de Cenicaña.

Con el control administrativo del riego se han logrado ahorros de agua entre 200-300 m<sup>3</sup>/ha por cada evento de riego, lo cual representa 800-1200 m<sup>3</sup>/ha por año. Al adoptar esta metodología en 120 mil hectáreas se podría ahorrar como mínimo 96 millones de m<sup>3</sup> de agua al año.

La hoja de cálculo para el Control Administrativo del Riego se puede descargar del sitio web de Cenicaña <[www.cenicana.org/investigacion/agronomia/manejo\\_aguas.php](http://www.cenicana.org/investigacion/agronomia/manejo_aguas.php)>

También se puede solicitar al correo <[admin\\_web@cenicana.org](mailto:admin_web@cenicana.org)>

### Bibliografía de referencia

*Gestión de calidad del riego en caña de azúcar* (Cruz, Besosa y Gómez, 1997)

*Control administrativo del riego asistido por computador* (Cruz, 2000)

## Control Administrativo del Riego

Información de campo e indicadores de gestión incluidos en la hoja de cálculo

### Datos básicos de la suerte

- Hacienda, suerte y fecha de riego
- Textura del suelo: Arcillosa\_\_\_ Franca\_\_\_ Arenosa\_\_\_
- Ciclo de cultivo: Plantilla\_\_\_ Soca\_\_\_
- Aplicación del agua: Surco continuo\_\_\_ Alterno\_\_\_
- Encalle: 4x1\_\_\_ 2x1\_\_\_
- Longitud del surco (m): \_\_\_
- Espaciamiento entre surcos (m): \_\_\_

### Registros durante la labor de riego

- Hora en que llega el regador (hh:mm): \_\_\_
- Hora en que sale el regador (hh:mm): \_\_\_
- Hora en que llega el agua (hh:mm): \_\_\_
- Caudal por surco (L/s): \_\_\_
- Caudal por regador (L/s): \_\_\_
- Tiempo de avance del agua en el surco (hh:mm): \_\_\_
- Número de surcos regados por jornada (No.): \_\_\_
- Lámina de riego requerida (mm): \_\_\_
- Tiempo total de suspensión del agua (hh:mm): \_\_\_

### Variables de control

- Volumen de agua aplicado (m<sup>3</sup>/ha): \_\_\_
- Eficiencia de aplicación (%): \_\_\_
- Área regada por jornal (ha/jornal): \_\_\_
- Sincronización del agua (hh:mm): \_\_\_
- Eficiencia administrativa (%): \_\_\_

### Aspectos que requieren verificación

- Cómo es el estado de humedad del suelo hasta 50 cm de profundidad: Seco\_\_\_ Agrietado\_\_\_
- Cuál es el estado de la pendiente en la dirección del surco: Adecuado\_\_\_ Inadecuado\_\_\_
- Cuál es la condición de las calles o entresurcos (dibujar sección hidráulica): Uniforme\_\_\_ Desuniforme\_\_\_
- En la parte media de la sección hidráulica:
  - Cuál es la profundidad (cm): \_\_\_
  - Presenta obstáculos del flujo: Si\_\_\_ No\_\_\_
  - La pendiente del fondo es uniforme: Si\_\_\_ No\_\_\_

## Riego por surco alterno

El riego por surco alterno consiste en colocar el agua surco de por medio, sin que para ello sea necesario hacer inversiones o cambios en la infraestructura de campo, pues las condiciones son prácticamente iguales a las indicadas para regar por surco continuo: nivelación adecuada, suelos de textura fina a moderada, conformación de los entresurcos y entresurcos libres de obstáculos; sólo se requiere aumentar un poco (25%) el caudal por surco.

El surco alterno se recomienda para riegos de levantamiento en plantilla y las socas con encalle al 5x1. Para los riegos de germinación o acompañamiento de la fertilización se recomienda hacer las aplicaciones por surco continuo o preferiblemente por aspersión, con el fin de aplicar láminas de agua controladas que no superen los 40 mm por riego.

Con base en los resultados de 22 experimentos realizados de forma cooperativa entre Cenicaña y varios ingenios durante siete años continuos (1988 a 1994, incluidos los años 1991 y 1992 que fueron extremadamente secos debido al fenómeno de El Niño) se comprobó que al regar por surco alterno las producciones de caña y azúcar son equivalentes a las obtenidas con el sistema de surco continuo, con un ahorro de agua entre 25-50%, es decir, unos 500 m<sup>3</sup>/ha por riego ó 2000-2500 m<sup>3</sup>/ha por año, y se aumentó la eficiencia de los regadores entre 20-60% al pasar de 1.2 ha/jornal a 1.7 ha/jornal (Torres, Cruz y Villegas, 1997). Así, con un precio del metro cúbico de agua de \$70, costo promedio para agua superficial y subterránea, el ahorro por hectárea sería de \$140 mil. En el área potencial que corresponde a cultivos de primer corte o plantillas, estimada en 35 mil hectáreas, el ahorro de agua puede alcanzar los 70 millones de m<sup>3</sup>/año, un valor estimado de 4900 millones de \$/año.



*Surco alterno en plantilla y en socas con residuos picados*



*Surco alterno en socas con residuos encallados al 5x1*

## Surco alterno modificado por el encalle

En las socas, el riego por surcos se debe adaptar al esquema seguido para el manejo de los residuos bien sea en caña quemada o en caña verde. En los campos quemados antes de la cosecha el encalle más común es al 4x1, de modo que el agua se puede colocar en dos calles de las cuatro calles sin residuos; esta forma de aplicación se constituye en una opción económica de ahorro de agua, puesto que el número de surcos que conducen agua es el 40% del total de surcos y por tanto el ahorro potencial de agua es del 60%. En campos cosechados en verde, donde el encalle normal es al 2x1, el riego se puede realizar colocando el agua en una de las dos calles o entresurcos sin residuos (riego al "1x2"), una opción económica debido a que el número de surcos que transportan agua es el 33% del total de surcos, lo cual se traduce en un ahorro potencial de agua del 67%.



▲ Encalle al 4x1

▼ Encalle al 2x1



## Tuberías con compuertas para el riego por surcos

Con el uso de politubulares o tuberías de PVC con compuertas es posible reducir el consumo de agua entre 400-600 m<sup>3</sup>/ha, incrementar el rendimiento de los regadores, recuperar áreas para el cultivo al eliminar las acequias de riego con lo cual se facilita además el desplazamiento de los equipos de cosecha y cultivo, preservar el recurso hídrico superficial y subterráneo e incrementar la producción, entre otros beneficios.

Las evaluaciones de los politubulares como reemplazo de las acequias de riego se iniciaron en 1990, cuando en el Ingenio Central Castilla y con la cooperación de Cenicaña se logró un ahorro de agua de 400 m<sup>3</sup>/ha por cada riego, con un incremento del rendimiento de los regadores del 21% (Benítez, 1994). Posteriormente, en 1997 el Ingenio Manuelita realizó otra evaluación y obtuvo un ahorro de agua de 600 m<sup>3</sup>/ha y un incremento en el rendimiento de los regadores del 47% (Rebolledo, 1997). Con el uso de politubulares se puede incorporar una franja de terreno de 150 m<sup>2</sup> por cada hectárea, de modo que si la producción es de 120 t/ha y el rendimiento es de 11.5% se podría obtener una producción extra de 1.8 toneladas de caña y 207 kg de azúcar.

En 1994 se inició el uso de tubería de PVC con compuertas con resultados muy positivos, puesto que el rendimiento de un regador en una jornada de 12 horas puede pasar de 2 ha/día a 5 ha/día y el ahorro de agua llega a superar los 600 m<sup>3</sup>/ha debido a la conducción por tubería y la disminución del consumo de agua por efecto de la mayor área regada por día (Cruz *et. al.*, 2003b).

De acuerdo con lo anterior, al tomar como base el ahorro mínimo de agua de 400 m<sup>3</sup>/ha por cada evento de riego, en un año el ahorro es de 1600-2000 m<sup>3</sup>/ha (176 mil \$/ha por año, con un precio del agua de 110 \$/m<sup>3</sup> mediante conexión directa a pozo profundo). Con respecto a la mano de obra el ahorro es de 0.38 jornales/ha por riego, que en un año equivale a 1.5 jornales/ha. Por tanto, en una área potencial de adopción estimada en 50 mil hectáreas, el uso de tubería con compuertas puede significar un ahorro de agua de 80 millones de m<sup>3</sup>/año (8800 millones \$/año).



**Con el uso de politubulares o tuberías de PVC con compuertas se pueden ahorrar entre 400-600 m<sup>3</sup> de agua por hectárea**



**Ochenta millones de metros cúbicos de agua por año es el volumen mínimo de ahorro por usar tubería con compuertas en 50 mil hectáreas**

## Riego por pulsos

El riego por pulsos se define como la aplicación intermitente de agua a los surcos y es un sistema de gran potencial para mejorar la eficiencia de aplicación del riego por surcos.

Cenicafña y el Ingenio Manuelita realizaron, con cofinanciación de Colciencias, evaluaciones hidráulicas y administrativas del riego por pulsos en surco alterno en la zona más seca del ingenio, con el fin de comparar esta tecnología con el riego con caudal continuo (Cruz *et al.*, 2003a). De acuerdo con los resultados, en el riego por pulsos se utilizaron volúmenes de agua menores en 29% con respecto al caudal continuo y el área regada aumentó en 50%, de modo que los costos de riego disminuyeron en 35% al aplicar el riego por pulsos.

En el Ingenio Providencia, donde se hizo un seguimiento comercial del riego por pulsos, se logró un ahorro de agua de 22% y un aumento de 46% en el rendimiento de los regadores.

Así, al tomar como base un ahorro mínimo de agua de 240 m<sup>3</sup>/ha por cada evento de riego, es posible ahorrar en un año 960 m<sup>3</sup>/ha (106 mil \$/ha por año, con un precio del agua de 110 \$/m<sup>3</sup>).

Además, el ahorro en mano de obra es de 0.06 jornales/ha por riego, o sea que en un año el ahorro es de 0.24 jornales/ha.

En un área potencial de adopción estimada de 10 mil hectáreas, el ahorro de agua sería de 9.6 millones de m<sup>3</sup>/año, equivalentes a \$1000 millones/año.

## Riego con caudal reducido

El riego con caudal reducido consiste en la aplicación permanente de agua en pequeños caudales en la cabecera de los surcos (0.1-0.3 L/s), aprovechando la cabeza hidráulica que provee la pendiente del terreno para su funcionamiento.

Este sistema de riego se convierte en una opción para aprovechar los bajos caudales de las fuentes de agua disponibles para la agricultura en el piedemonte, donde hay pendientes mayores del 1%, suelos poco profundos, alto contenido de piedra, baja capacidad de almacenamiento de agua y alto riesgo de erosión. El agua se conduce y se aplica a los lotes mediante tuberías, sin pérdidas de agua, con lo cual se consiguen eficiencias de riego altas.

Los resultados de la experimentación son positivos y el sistema se muestra como promisorio en predios con poca disponibilidad de agua para riego (Campos, Cruz y Torres, 2009).

En socas con encalle al 2x1, el riego con caudal reducido colocando el agua en una de las dos calles sin residuos (riego al 1x2) de manera alterna en el tiempo ha permitido obtener ahorros de agua hasta del 47% con relación al riego por surcos convencional al 2x1, con producciones de caña por hectárea similares.

La tecnología de caudal reducido tiene un costo de inversión de aproximadamente \$1,400,000/ha, incluido el valor del diseño y la dirección de la obra, los materiales y los jornales para la instalación.

## Referencias bibliográficas

- Benítez C., E. 1994. Evaluación hidráulica y económica de politubulares con orificios para riego por surcos en caña de azúcar. Tesis, Ingeniero Agrícola, Universidad del Valle-Universidad Nacional, sede Palmira.
- Campos R., A.; Cruz B., D.M.; Torres, J.S. 2009. Riego con caudal reducido. p.280-288 En: Congreso de la Asociación Colombiana de Técnicos de la Caña de Azúcar, 8. Memorias. Cali, Colombia. 16-18 sept., 2009. Tecnicaña, Cali, Colombia.
- Cruz V., R.; Álvarez L.; Prada, M.A.; Sluga L. 2003a. El riego por pulsos: un paso más hacia la reducción de los costos de riego en caña de azúcar. p.134-142 En: Congreso de la Asociación Colombiana de Técnicos de la Caña de Azúcar, 6. Memorias. Cali, Colombia. 24-26 sept., 2003. Tecnicaña, Cali, Colombia.
- Cruz V., R.; Posada C., C.; Lemos, R.D.; Valdés, A. 2003b. Comparación entre politubulares y tuberías de PVC con compuertas para riego por surcos. p.122-133. En: Congreso de la Asociación Colombiana de Técnicos de la Caña de Azúcar, 6. Memorias. Cali, Colombia. 24-26 sept., 2003. Tecnicaña, Cali, Colombia.
- Cruz V., R.; Torres, J.S. 2003. Manejo del riego en campos con residuos de la cosecha. Cenicafña, Cali, Colombia. 8p. (Serie Divulgativa, No.08)
- Cruz V., R. 2000. Control administrativo del riego asistido por computador. Carta Trimestral, v.22, 4 (octubre-noviembre):7-9
- Cruz V., R.; Besosa T., R.; Gómez P, J.F. 1997. Gestión de calidad del riego en caña de azúcar. v.1., p.217-228. En: Congreso de la Asociación Colombiana de Técnicos de la Caña de Azúcar, 4. Memorias. Cali, Colombia. 24-26 sept., 1997. Tecnicaña, Cali, Colombia.
- Rebolledo R., J.P. 1997. Evaluación operativa del riego con politubulares. v.1, p.229-242. En: Congreso de la Asociación Colombiana de Técnicos de la Caña de Azúcar, 4. Memorias. Cali, Colombia. 24-26 sept., 1997. Tecnicaña, Cali, Colombia.
- Torres, J.S.; Cruz V., R. y Villegas T., F. 2004. Avances técnicos para la programación y el manejo del riego en caña de azúcar. 2a. ed. Cenicafña, Cali, Colombia. 66p. (Serie Técnica, No.33)
- Torres, J.S.; Cruz V., R.; Villegas T., F. 1997. Riego por surco alterno en caña de azúcar. v.1, p.191-199. En: Congreso de la Asociación Colombiana de Técnicos de la Caña de Azúcar, 4. Memorias. Cali, Colombia. 24-26 sept., 1997. Tecnicaña, Cali, Colombia.
- Torres, J.S.; Cruz V., R. 1995. El Cenirrómetro. 2a. ed. Cenicafña, Cali, Colombia. 4p. (Serie Divulgativa, No.03)
- Torres, J.S.; Cruz V., R. 1993. El aforador RBC: una estructura sencilla para canales de riego. Cenicafña, Cali, Colombia. 4p. (Serie Divulgativa, No.04)

# Riego con caudal reducido

Armando Campos R. y Doris Micaela Cruz B.\*

## Avances de investigación

Resultados preliminares y conclusiones finales de los proyectos de investigación científica y tecnológica de Cenicaña



## Introducción

En el valle del río Cauca se cultivan actualmente cerca de 208 mil hectáreas con caña de azúcar para la producción de azúcar y etanol, de las cuales aproximadamente 50 mil hectáreas corresponden a zonas de piedemonte de las cordilleras Central y Occidental ubicadas por encima de la cota de 1050 metros sobre el nivel del mar y en donde la pendiente del terreno varía entre 1% y 7.5%.

Según los registros de la Red Meteorológica Automatizada de la agroindustria azucarera, la precipitación media anual en el período 1994-2009 fue de 1253 mm; el año 2008 fue el más lluvioso (1664 mm) y el 2001, el menos lluvioso (985 mm) (Cenicaña, 2010). El clima en el valle del río Cauca se caracteriza por un régimen bimodal de la precipitación, con dos temporadas lluviosas y dos temporadas secas. Los meses más representativos de las temporadas lluviosas son abril-mayo y octubre-noviembre y de las temporadas secas, enero-febrero y julio-agosto. Marzo, junio, septiembre y diciembre se consideran meses de transición.

De acuerdo con los resultados de la experimentación realizada por Cenicaña se estima que los requerimientos de agua de la caña de azúcar oscilan entre 1050 mm y 1300 mm por un ciclo de cultivo de trece meses (Torres *et al.*, 2004). En el valle del río Cauca cerca del 95% del área cultivada recibe riegos suplementarios, aplicados principalmente por surcos (gravedad o superficie), de modo que la productividad alcanzada ha dependido en buena parte del suministro oportuno de agua al cultivo, especialmente en los períodos secos cuando se presenta déficit de humedad en el suelo. En 2009, en los campos con manejo directo de seis ingenios los riegos representaron el 10% de los costos de campo (incluidos costos de preparación, adecuación, siembra, levantamiento e indirectos) y el 21% de los costos de levantamiento del cultivo.

\* Ingeniero Agrícola, M.Sc., Asesor en Manejo de Aguas <acampos@cenicana.org>; Ingeniera Agrícola, Investigadora Temporal en Manejo de Aguas <dmcruz@cenicana.org>. Ambos de Cenicaña.

Durante los últimos treinta años los ingenios azucareros y los cultivadores de caña, a través de Cenicaña, han promovido la investigación y el desarrollo tecnológico en el manejo de las aguas de riego y drenaje en la agroindustria azucarera, de manera que hoy se cuenta con la tecnología necesaria para la producción de caña con fundamentos científicos y criterios prácticos en la gestión eficiente del recurso hídrico y su uso racional.

En este documento se presentan los avances en el desarrollo de la tecnología de riego por surcos con caudales reducidos para el cultivo de la caña de azúcar en el piedemonte, con resultados promisorios en tales zonas y perspectivas de viabilidad en zonas planas. La iniciativa es coordinada por el Programa de Agronomía de Cenicaña y cuenta con el apoyo de los ingenios azucareros y los proveedores de caña y con recursos de cofinanciación otorgados por el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR, Convocatoria nacional para la cofinanciación de programas y proyectos de investigación, desarrollo tecnológico e innovación para el sector agropecuario por cadenas productivas con énfasis en cambio climático, 2008).

La experimentación del riego con caudal reducido tiene como objetivo contribuir a mitigar los efectos del cambio climático a través del uso racional y eficiente del agua en el cultivo de la caña de azúcar en Colombia. Es un complemento de las tecnologías disponibles y transferidas por Cenicaña, las cuales han sido adoptadas progresivamente por los cañicultores del valle del río Cauca, con más énfasis en los últimos años, cuando el cambio climático ha causado la disminución de los caudales de las fuentes de agua superficiales debido a anomalías en la cantidad y frecuencia de las lluvias, y cuando la variabilidad de los caudales ha ido en aumento por efecto de la intervención humana en los ecosistemas de páramo, la tala de bosques en las cuencas y la extracción de agua a lo largo de su recorrido.



**Los resultados en zonas del piedemonte son promisorios y señalan que el sistema puede ser viable también en zonas de la parte plana del valle del río Cauca.**

## **Antecedentes**

En Venezuela, en la estación experimental Lara-Barquisimeto, Bohórquez y García (1985), con la idea de lograr un manejo eficiente del agua por parte de los agricultores en zonas donde el agua es escasa, ensayaron una técnica de riego denominada "riego por chorrito", que consiste en la combinación de riego por goteo y gravedad por surcos, en la cual el agua se lleva por tuberías desde la fuente hasta la cabecera del lote por regar, para luego aplicarla en cada surco mediante pequeñas salidas con caudales del orden de L/hora y tiempos de aplicación de 24 horas, es decir, riego permanente.

En Colombia, investigadores del Programa de Agronomía de Cenicaña dirigieron un trabajo de grado de los estudiantes Díaz y Prieto (2000) con el fin de evaluar mediante un ensayo preliminar el riego con caudal reducido en la hacienda El Reporter (Riopaila Castilla, planta Castilla) localizada en el municipio de Miranda, en un suelo de la consociación Porvenir (Typic Argiudoll, franco arcilloso) con contenido de grava del 15% y caracterizado por una tasa de infiltración baja, drenaje interno pobre y pendientes entre 2% y 3%. Se evaluaron caudales (L/s) de 0.025, 0.05 y 0.1. Los resultados mostraron un aumento de las eficiencias de almacenamiento y uso del agua con una disminución de las áreas con déficit de riego. En este trabajo se determinaron los valores de los coeficientes de descarga de Hazen-Williams (Sotelo, 1974) para tuberías de polietileno reciclado según el diámetro de éstas: coeficientes de 80 para diámetros de 3", 116 para 2" y 76 para 1/2".

En el año 2006 Cenicaña inició la investigación actual que hasta junio de 2010 daba cuenta de cuatro experimentos y una instalación comercial con resultados en plantilla y primera soca en suelos de piedemonte de textura esquelética arcillosa y textura arcillosa sobre esquelética arcillosa. Hasta mayo de 2010 se sumaban 186 hectáreas con instalaciones para el riego con caudal reducido, en tierras vinculadas con siete ingenios azucareros donde los cultivadores de caña y el centro de investigación están comprometidos con el desarrollo de la tecnología. El proceso incluye evaluaciones integradas del sistema a través de pruebas experimentales y comerciales.

## **Descripción del sistema**

Según la información disponible en el Sistema de Información Geográfica administrado por Cenicaña, cerca del 25% del área cultivada en caña de azúcar en el valle del río Cauca se localiza en el piedemonte de las cordilleras Occidental y Central.

Los suelos del piedemonte se caracterizan por tener poca profundidad, altos contenidos de grava (entre

el 10% y el 32% en volumen) y pendiente del terreno mayor del 1%. Los altos contenidos de piedra disminuyen la capacidad de almacenamiento de humedad del suelo y su fertilidad, por lo cual es necesario hacer riegos frecuentes, en algunos casos por aspersión, con los altos costos que conlleva esta práctica.

El riego con caudales reducidos consiste en la aplicación permanente de agua en pequeños caudales en la cabecera de los surcos, aprovechando la cabeza hidráulica que provee la pendiente del terreno para su funcionamiento. En este sistema se aprovechan las fuentes de bajos caudales y se utilizan materiales de bajo costo, fácil consecución en los mercados locales y manipulación conocida por los agricultores, como tuberías de polietileno reciclado y PVC, aditamentos de PVC, aluminio fundido, polietileno, hierro galvanizado y llaves de paso para controlar el caudal. El agua se conduce y se aplica a los lotes mediante tuberías, sin pérdidas de agua, con lo cual se consiguen eficiencias de riego altas.

Este sistema de riego se convierte en una opción para la aplicación del agua que facilita el aprovechamiento de los bajos caudales de las fuentes de agua disponibles para la agricultura en el piedemonte.

### Sitios experimentales y tratamientos

El riego con caudal reducido ha sido probado en áreas experimentales y comerciales de los ingenios Riopaila Castilla (planta Castilla: haciendas Vallecito, La Fría y Los Ranchos), Pichichí (hacienda Lorena) y Providencia (hacienda La Italia Molinares). Los experimentos en Los Ranchos y la Italia Molinares se desarrollan con la cofinanciación del MADR.

En las haciendas Vallecito, La Fría y Lorena se realizaron pruebas para el perfeccionamiento hidráulico del sistema y la evaluación de su eficacia como método de riego para la caña de azúcar en el piedemonte; en los dos últimos sitios se midió la respuesta de la caña ante diferentes formas de aplicación del riego con caudal reducido y se comparó con otros métodos de riego, de forma que se contabilizaron el gasto de agua y el ahorro.

En todos los sitios se caracterizó el área experimental en cuanto a topografía (planimetría y altimetría), cabeza hidráulica disponible, perfil del suelo, textura, densidad aparente, infiltración y contenido de grava. En la Figura 1 se muestra el perfil de un suelo característico del piedemonte. Se determinaron además las pendientes de los surcos, así como el caudal disponible y los caudales por surco. La conducción y distribución del agua se realizó mediante tuberías de polietileno reciclado de diámetros de 3" (75 mm) y 2" (50 mm); la aplicación de agua a los surcos se hizo con tubos de polietileno virgen de 6 mm, 12 mm y 16 mm (Figura 2); también se usaron tubos cortos de PVC de diámetros pequeños.



Figura 1. Suelo característico del piedemonte, poco profundo y con altos contenidos de piedra, por lo cual es necesario hacer riegos frecuentes.



Figura 2. Aplicación de agua al surco con tubería de polietileno de 16 mm de diámetro en el sistema de riego con caudal reducido.

- **Hacienda Vallecito (Castilla):** En la suerte 070, zona agroecológica 29H0, suelo Pichichí (Vertic Argiustolls, familia textural esquelética arcillosa) sembrado con la variedad Co 421 (cuarto corte) se utilizó un diseño experimental de bloques completos al azar con seis tratamientos y cuatro repeticiones. Los tratamientos consistieron en aplicar caudales por surco comprendidos entre 0.06-0.12 L/s, mediante tubos de polietileno de 6 mm de diámetro; se dispuso de una cabeza hidráulica de 19.2 m y un caudal del sistema de 1.7 L/s. Las parcelas experimentales estuvieron constituidas por seis surcos de 70-100 m de longitud y pendientes entre 1.7-4.9%.
- **Hacienda La Fría (Castilla):** En la suerte 030, zona agroecológica 27H0, suelo Italia (Typic Argiustolls, familia textural arcillosa sobre esquelética arcillosa), sembrada con la variedad CC 84-75 (plantilla) se estableció una instalación comercial con cinco sectores de riego, cada uno con 30 salidas en riego por surco alterno. Se aplicaron caudales por surco de 0.09 L/s con un coeficiente de uniformidad de 0.76 y un caudal del sistema de 2.75 L/s, para una cabeza hidráulica de 43 m.
- **Hacienda Lorena (Pichichí):** En la suerte 16, zona agroecológica 26H0, suelo Esneda (Typic Haplusterts, familia textural arcillosa sobre esquelética arcillosa) con contenidos de grava del 22%, longitud de los surcos de 123 m y pendiente del 3%, en la variedad CC 85-92 se probó el riego con caudal reducido en plantilla y primera soca. En la plantilla, a pesar de haber aplicado caudales por surco hasta de 0.3 L/s, el riego sólo logró cubrir 50 m de la longitud total de los surcos debido a la falta de aporque. En la primera soca, con el aporque adecuado, se probaron tubos cortos de PVC con diámetros desde 16 mm hasta 50 mm para aplicar el agua a los surcos desde la acequia de cabecera, de modo que se obtuvieron diferentes caudales (desde 0.18 L/s hasta 1.63 L/s) y tiempos de avance entre 3 y 25 horas, con cargas hidráulicas entre 8 cm y 16 cm. Luego de los ensayos se seleccionó el tubo "conduit" de PVC de diámetro interno de  $\frac{3}{4}$ " (23.6 mm), que suministra un caudal de 0.30 L/s con una carga hidráulica de 11 cm, un tiempo de avance de 20.4 horas y una lámina aplicada de 128 mm por riego (Figura 3). Se evaluaron tres tratamientos de riego con caudal reducido (al 2x1, al 1x2 y al 1x2 alterno) y un tratamiento de riego convencional con un caudal por surco de 5 L/s en la modalidad al 2x1, en cuatro repeticiones.
- **Hacienda Los Ranchos (Castilla):** En la suerte 60, zonas agroecológicas 22H0 y 27H1, suelos Acuario (Typic Haplustolls, familia textural

esquelética francosa) e Italia (Typic Argiustolls, familia textural arcillosa sobre esquelética arcillosa), el experimento fue sembrado el 19 de septiembre de 2008 con la variedad CC 84-75. El agua se tomó de un reservorio situado a 370 m de distancia y una cota de 25.5 m sobre la cabecera del área experimental, con una pendiente del terreno en el sentido de los surcos del 3%. El experimento incluyó cinco tratamientos y cuatro repeticiones: tres tratamientos de caudal reducido (surco continuo, alterno y alterno-alterno), un testigo sin riego y un testigo comercial (con riego por aspersión). En los tratamientos de riego con caudal reducido por surco alterno y surco alterno-alterno se buscó establecer alternativas de riego adaptadas a una situación de cambio climático caracterizada por disminución de lluvias y escasez de agua para riego; para ello se utilizaron láminas que son aproximadamente la mitad de las aplicadas en el riego con caudal reducido por surco continuo.

- **Hacienda la Italia Molinares (Providencia):** En este experimento se tienen los mismos tratamientos descritos antes para la hacienda Los Ranchos pero con un testigo comercial con riego por gravedad, con igual diseño experimental. Está ubicado en la suerte 1 de la Italia Molinares, zonas agroecológicas 26H0 y 27H1, suelos Esneda (Typic Haplusterts, familia textural arcillosa sobre esquelética arcillosa) e Italia (Typic Argiustolls, familia textural arcillosa sobre esquelética arcillosa), donde se sembró la variedad CC 85-92 el 5 de octubre de 2008. La fuente de agua es un reservorio situado a 100 m de distancia y con una cota de 5.12 m sobre la cabecera del área experimental (2.4 ha), con pendiente del 3% en la dirección de los surcos.



Figura 3. Aplicación de agua al surco en el sistema de riego con caudal reducido. Hacienda Lorena, Ingenio Pichichí.

## Resultados hídricos y de cosecha

- **Hacienda Vallecito (Castilla):** Durante el ciclo de cultivo (edad de cosecha: 11.5 meses) se presentaron 1025 mm de precipitación y 1856 mm de evaporación. El tratamiento en el que se logró mayor tonelaje de caña por hectárea (80 TCH) se utilizó un caudal promedio de 0.11 L/s de modo que la caña recibió una lámina por riego de 86 mm y un volumen total de riego de 2329 m<sup>3</sup>/ha aplicado en tres eventos, con tiempo de avance de 24 horas. El resultado de este tratamiento significó un aumento de producción del 42% con relación al testigo sin riego (diferencias estadísticas al 2%). El tonelaje obtenido en el tratamiento comercial fue igual al del testigo sin riego (56 TCH), sin diferencias estadísticas en sacarosa (% caña) (Campos *et al.*, 2009). Caudales pequeños (0.06 L/s y 0.08 L/s) generaron láminas de riego excesivas (203 mm y 239 mm) debido al incremento en los tiempos de avance. Por su parte, caudales muy altos (0.12 L/s) resultaron en láminas de riego insuficientes (68 mm) que finalmente afectaron de forma negativa la producción. La baja producción de la suerte pudo ser debida a una fertilización insuficiente que no compensó el alto contenido de piedra (32%) en el perfil del suelo; puede ser posible lograr aumentos en el tonelaje con una aplicación de fertilizante más generosa.
- **Hacienda La Fría (Castilla):** En esta instalación el riego con caudal reducido en la modalidad de surco alterno resultó en producciones similares a las conseguidas con el riego por aspersión (84 TCH y 88 TCH, respectivamente).
- **Hacienda Lorena (Pichichí):** Con 1294 mm de precipitación y 1664 mm de evaporación durante la primera soca, el testigo con riego por surcos convencional al 2x1 recibió siete riegos, de los cuales dos fueron de germinación y cinco fueron de levantamiento. Los tratamientos con caudal reducido recibieron cinco riegos (dos de germinación, un riego de levantamiento que fue necesario aplicar de modo convencional mientras se probaban los tubos cortos y dos riegos de levantamiento con caudal reducido). En estas condiciones las variables TCH y sacarosa % caña no presentaron diferencias estadísticas significativas entre tratamientos (Ibid). Sin embargo, el tratamiento de caudal reducido al 1x2 alterno presentó una diferencia de 8 TCH con respecto al riego por surcos convencional al 2x1, lo cual coincide con lo observado en evaluaciones anteriores de riego convencional por surcos, en las cuales el surco alterno-alterno presentó una producción un poco superior a la del surco continuo.

Vale recordar que en este experimento se aplicaron tres tratamientos de riego con caudal reducido (al 2x1, al 1x2 y al 1x2 alterno) y un tratamiento convencional por surcos al 2x1. El volumen aplicado con caudal reducido al 2x1 fue el 55% del aplicado con el riego convencional al 2x1 que, con un caudal por surco de 5 L/s, presentó una eficiencia de aplicación del 38%. La eficiencia de aplicación del riego al 2x1 con caudal reducido fue del 43%. Las eficiencias del riego con caudal reducido al 1x2 y al 1x2 alterno fueron del 49% y el 48%, con un gasto de agua cercano a la mitad del empleado en el riego convencional al 2x1.

- **Hacienda Los Ranchos (Castilla):** Con una precipitación de 1250 mm y una evaporación de 1721 mm durante el ciclo del cultivo, el testigo comercial (aspersión) recibió un menor número de riegos debido al alto costo por riego, aunque con un volumen total de 4527 m<sup>3</sup>/ha, similar al recibido por los tratamientos de surco alterno con caudal reducido (4436 m<sup>3</sup>/ha y 4458 m<sup>3</sup>/ha), lo cual pudo ser una causa de la menor respuesta en producción del testigo comercial.

Al comparar las producciones de los tratamientos con riego y del testigo sin riego se encontraron diferencias estadísticas significativas al 2% en TCH; el riego con caudal reducido presentó aumentos de producción del 23% con respecto al testigo sin riego y de 9.3% en relación con el riego por aspersión (Cuadro 1). Los volúmenes de agua aplicados con caudal reducido por surco alterno y alterno-alterno correspondieron al 53% del volumen gastado en surco continuo, con eficiencias de aplicación del orden del 55% y ahorros de agua que superaron los 5000 m<sup>3</sup>/ha durante el ciclo de cultivo, sin que se presentaran diferencias estadísticas en producción entre ellos.

- **Hacienda la Italia Molinares (Providencia):** En el Cuadro 2 se muestran los resultados hídricos y de cosecha obtenidos en este experimento. Con una precipitación de 1156 mm y una evaporación de 1772 mm en el ciclo de cultivo de 15.5 meses, la productividad del tratamiento de riego con caudal reducido en surco continuo superó en 38% al testigo sin riego, en 24% al testigo comercial (riego por gravedad convencional) y en 7% y 6% al riego con caudal reducido por surco alterno y por surco alterno-alterno. En el tratamiento con caudal reducido por surco continuo la caña recibió una cantidad superior de agua de riego durante el ciclo de cultivo, cuatro veces la recibida por el testigo comercial (regado según el criterio del agricultor en condiciones de escasez de agua) y dos veces la recibida por el tratamiento de riego con caudal reducido por surco alterno. El tratamiento de caudal

reducido por surco alterno presentó un ahorro de agua cercano a los 5000 m<sup>3</sup>/ha. En condiciones de escasez de agua por la presencia del fenómeno de El Niño, es indudable que el riego por surco alterno cobra gran importancia por su potencial para regar un área mayor con la misma cantidad de agua o realizar mayor número de riegos al cultivo.

En las haciendas Los Ranchos y la Italia Molinares se realizaron mediciones de escorrentía superficial con resultados que muestran que al final del surco sólo se pierde un volumen de agua menor del 1% del aplicado en la cabecera; así mismo, que el agua no sufre alteración significativa en su calidad en el tránsito a lo largo del surco.

## Análisis económico

En los experimentos de caudal reducido establecidos en las haciendas Los Ranchos y La Italia Molinares se determinó la relación beneficio-costos del riego con caudal reducido y se comparó con la del riego comercial realizado en cada sitio (gravedad o aspersión), teniendo en cuenta: costos de inversión, costos de operación y mantenimiento, ingresos netos incrementales y costo financiero.

Los costos de inversión sólo se tuvieron en cuenta para el riego con caudal reducido, por cuanto el riego por aspersión se contrata y el riego por gravedad se carga a los costos de operación y mantenimiento.

Cuadro 1. Resultados hídricos y de cosecha. Hacienda Los Ranchos, suerte 60, Riopaila Castilla (planta Castilla). Variedad CC 84-75 (plantilla).

Tratamiento de riego	Volumen por riego (m <sup>3</sup> /ha)	Volumen total aplicado (m <sup>3</sup> /ha)	Número de riegos	Eficiencia de aplicación (%)	Ahorro de agua <sup>1</sup>		TCH	Sacarosa (% caña)	TSH
					(m <sup>3</sup> /ha)	%			
Testigo sin riego	0	0	0	0	0	0	105c*	14.8	15.5b
Aspersión	1509	4527	3	23	4953	52	118b	15.9	18.72a
Caudal reducido									
Surco continuo	1357	9480	7	26	0	0	131a	15.3	20.07a
Surco alterno	634	4436	7	55	5044	53	127ab	16.0	20.40a
Alterno-alterno	637	4458	7	55	5022	53	129ab	15.8	20.52a
Promedio							122	15.6	19
Coeficiente de variación							5.8	5.23	9.15

1. Ahorro de agua con respecto al riego con caudal reducido en surco continuo.

\* Valores con letras iguales no presentan diferencias significativas (LSM, 5%)

Cuadro 2. Resultados hídricos y de cosecha. Hacienda La Italia Molinares, suerte 1, Ingenio Providencia. Variedad CC 85-92 (plantilla).

Tratamiento de riego	Volumen por riego (m <sup>3</sup> /ha)	Volumen total aplicado (m <sup>3</sup> /ha)	Número de riegos	Eficiencia de aplicación (%)	Ahorro de agua <sup>1</sup>		TCH	Sacarosa (% caña)	TSH
					(m <sup>3</sup> /ha)	%			
Testigo sin riego	0	0	0	0	0	0	52bc*	15.8	8.15b
Gravedad	580	2320	4	47	7121	75	58bc	13.4	7.75b
Caudal reducido									
Surco continuo	944	9441	10	29	0	0	72a	15.9	11.4a
Surco alterno	476	4756	10	57	4685	50	67ab	15.1	10.15a
Alterno-alterno	531	5307	10	51	4134	44	68a	15.6	10.65a
Promedio							63	15.2	9.62
Coeficiente de variación							9.6	8.6	13.19

1. Ahorro de agua con respecto al riego con caudal reducido en surco continuo.

\* Valores con letras iguales no presentan diferencias significativas (LSM, 5%)

La depreciación del sistema de riego con caudal reducido se consideró lineal (\$1,392,420 por hectárea para una vida útil de 10 años), con una depreciación por año de \$277,443/ha incluidos los intereses (tasa del 15% anual) (Cuadro 3).

En los costos de operación y mantenimiento en los dos sitios y para los tres sistemas (gravedad, aspersión y caudal reducido) se tuvieron en cuenta el costo del agua (fuente superficial: 16 \$/m<sup>3</sup>), los costos de la mano de obra por evento y el mantenimiento y la construcción de acequias para un ciclo de cultivo. En el riego por aspersión, además de lo anterior, se tuvieron en cuenta el alquiler del equipo y la mano de obra para cada evento de riego realizado (\$165,110/ha por riego).

El ingreso neto se determinó como la diferencia entre el ingreso bruto y los costos de la labor de riego; los demás costos se mantuvieron constantes dado que todos los tratamientos recibieron las mismas labores de campo. La producción se valoró en \$42,500/t de caña (50 kilos de azúcar/tonelada de caña \* \$850/kilo de azúcar). El ingreso neto incremental se determinó como los beneficios obtenidos con el riego con respecto al testigo sin riego de levantamiento.

Cuadro 3. Costos de inversión en el sistema de riego con caudal reducido, por hectárea.

Caudal reducido	Costo de inversión (\$/ha)
Jornales de instalación y acequias	242,420
Materiales	1,000,000
Diseño del sistema y dirección de obra	150,000
<b>Total</b>	<b>1,392,420</b>

- **Hacienda Los Ranchos (Castilla):** Los costos del riego con caudal reducido fueron inferiores a los costos del riego por aspersión (Cuadro 4). El riego con caudal reducido por surco alterno-alterno presentó la mayor relación beneficio/costo y un beneficio ambiental alto (con la mitad del volumen de agua aplicado se obtuvieron producciones similares, con respecto al surco continuo), y que el riego por aspersión presentó una relación beneficio/costo negativa.

- **Hacienda la Italia Molinares (Providencia):** Al realizar la comparación entre tratamientos se observó que la relación beneficio/costo fue menor que la unidad e inferior que la del riego por gravedad (en el riego con caudal reducido se realizó una inversión inicial y se causó un costo financiero no contabilizado en el riego por gravedad) (Cuadro 5). La baja productividad en este sitio experimental fue ocasionada por una baja población de tallos, una consecuencia de la falta de labores oportunas debido al bloqueo al que se vio sometido el ingenio en el año 2008. Sin embargo, el ingreso neto incremental del riego con caudal reducido en todas las modalidades estuvo por encima del registrado en el riego por gravedad.

El riego con caudal reducido por surco alterno-alterno presenta una relación beneficio/costo similar a la del surco continuo aunque, por ser menos operativo, es probable que los cultivadores terminen acogiendo el riego por surco alterno que (en comparación con el surco continuo) utiliza la mitad del volumen del agua de riego con respuestas en producción similares y beneficios económicos mayores, factores de gran importancia en condiciones de una aguda escasez de agua como las presentadas recientemente en el valle del río Cauca.

Cuadro 4. Análisis comparativo de costos, ingresos y relación beneficio/costo de los tratamientos evaluados en el experimento de riego con caudal reducido en la hacienda Los Ranchos, suerte 60, Riopaila Castilla (planta Castilla). Edad de corte: 13 meses.

Tratamiento de riego	TCH	Volumen total aplicado (m <sup>3</sup> /ha)	Costo labor de riego (\$/ha)	Ingreso bruto (\$/ha)	Ingreso neto incremental (\$/ha)	Beneficio/costo
Testigo sin riego	105	0	0	4,462,500	-	-
Aspersión	118	4527	581,762	5,015,000	-29,262	-0.1
Caudal reducido						
Surco continuo	131	9498	466,161	5,567,500	638,839	1.4
Surco alterno	127	4436	385,169	5,397,500	549,831	1.4
Alterno-alterno	129	4458	385,521	5,482,500	634,479	1.6

Cuadro 5. Análisis comparativo de costos, ingresos y relación beneficio/costo de los tratamientos evaluados en el experimento de riego con caudal reducido en la hacienda La Italia Molinares, suerte 1, Ingenio Providencia. Edad de corte: 15.5 meses.

Tratamiento de riego	TCH	Volumen total aplicado (m <sup>3</sup> /ha)	Costo labor de riego (\$/ha)	Ingreso bruto (\$/ha)	Ingreso neto incremental (\$/ha)	Beneficio/costo
Testigo sin riego	52	0	0	2,210,000	-	-
Gravedad	58	2320	135,120	2,465,000	119,880	0.9
Caudal reducido						
Surco continuo	72	9441	480,999	3,060,000	369,001	0.8
Surco alterno	67	4756	406,039	2,847,500	231,461	0.6
Alterno-alterno	68	5307	414,855	2,890,000	265,145	0.6



**El aporque es necesario para controlar la distribución del agua en los surcos.**

**Se recomienda conformar los entresurcos de forma trapezoidal, con altura entre 10-20 cm y base entre 50-60 cm de ancho.**



### **Difusión del sistema en áreas experimentales y comerciales**

Actualmente se tienen instalaciones para el riego con caudal reducido en quince zonas agroecológicas caracterizadas por suelos de diez familias texturales (Cuadro 6). Son suelos representativos de diez grupos homogéneos de suelos (grupos 2, 6, 10, 11, 18, 22, 26, 27, 29 y 31; Quintero *et al.*, 2008) en donde se presentan las condiciones de déficit o exceso de humedad definidas en los Grupos de Humedad 0, 1, 3, 4 y 5 (Torres *et al.* 2009). Las familias texturales de los suelos son: fina, muy fina, francosa fina, francosa gruesa, esquelética arcillosa, esquelética francosa, arcillosa sobre esquelética arcillosa, francosa fina sobre esquelética francosa, esquelética arcillosa sobre esquelética francosa y esquelética francosa-francosa fina sobre esquelética arenosa.

La tendencia en las instalaciones comerciales es el uso de tubería de PVC debido al menor costo de los materiales y a que las pérdidas de agua son nulas en comparación con las que ocurren con las tuberías de polietileno (Figura 4).



Figura 4. Distribución, llave de paso y elevador en el sistema de riego con caudal reducido. Hacienda El Waco, Ingenio Mayagüez.

Cuadro 6. Difusión del sistema de riego con caudal reducido en áreas experimentales y comerciales en zonas de piedemonte del valle del río Cauca. Mayo de 2010.

Ingenio	Hacienda (suerte)	Área (ha)	Suelo			Zona agroecol.	Actividad
			Consociación	Subgrupo	Familia textural		
Incauca	San Judas (15 y 16)	15.2	Troja	Udic Haplustolls	Fina	31H3	Instalación comercial
			América	Udorthentic Haplustolls	Francosa fina sobre esquelética francosa	6H4	
La Cabaña	Vallecito (7A)	5.8	Pichichí	Vertic Argiustolls	Esquelética arcillosa	29 H1	Instalación comercial + experimento (fertirriego con RCR <sup>1</sup> )
Manuelita	La Cabaña (4)	21.7	Rio Paila	Fluventic Hapustolls	Francosa gruesa	11H1	Instalación comercial + experimento (% área regada RCR)
			Palmira	Pachic Haplustolls	Francosa fina	18H1	
	San Antonio (6B)	3.6	Jordán	Typic Haplustolls	Francosa Fina	11H1	Pruebas de avance
Mayagüez	El Waco (60)	8.3	Santa Helena	Entic Haplustolls	Esquelética arcillosa	22H0	Instalación comercial + experimento (% área regada RCR)
	El Pindo (6)	25.4	Cantarina	Pachic Vertic Hapustolls	Fina	6H1	Instalación comercial
			Pindo	Vertic Argiustolls	Muy fina	2H1	
Providencia	Italia Molinares (1)	2.2	Esnedá	Typic Haplusterts	Arcillosa sobre esquelética arcillosa	26H0	Experimento
			Italia	Typic Argiustolls	Arcillo sobre esquelética arcillosa	27 H1	
	Piedechinche (47)	-	Cerrito-Nima	Entic Haplustolls	Esquelética francosa-francosa fina sobre esquelética arenosa	22H0	Se realizaron pruebas de avance. No funcionó el RCR.
Riopaila Castilla (planta Riopaila)	Los Ranchos (60)	2.2	Acuario	Typic Haplustolls	Esquelética francosa	22H0	Experimento
			Italia	Typic Argiustolls	Arcillosa sobre esquelética arcillosa	27H1	
	Los Ranchos (30)	20.6	Minga	Typic Haplustolls	Esquelética arcillosa sobre esquelética francosa	29H1	Instalación comercial
	Los Ranchos (50)	9.4	Italia	Typic Argiustolls	Arcillosa sobre esquelética arcillosa	27H1	
	La Fría (30)	10.8	Italia	Typic Argiustolls	Arcillosa sobre esquelética arcillosa	27H0	
	Oriente (10)	10.2	Troja	Udic Haplustolls	Fina	6H3	
	Las Brisas (10)	12.3	Argelia	Vertic Argiustolls	Fina	11H4	
Riopaila Castilla (planta Riopaila)	Zanjón Hondo (3)	4.5	Villa	Typic Haplustepts	Francosa fina	11H0	Instalación comercial
	Valparaíso (41 a 44)	38.0	Juanchito	Vertic Endoaquepts	Fina	10H5	
Total		185.7					

1. Riego con caudal reducido.

## Conclusiones

1. El riego con caudal reducido es promisorio para las condiciones del piedemonte por los bajos costos iniciales y de operación y las mayores eficiencias de riego.
2. Los caudales por surco entre 0.1–0.3 L/s se muestran como los más convenientes para el piedemonte porque no son erosivos y se adaptan a diferentes pendientes (1.9–4.7%); además, con estos caudales se logran avances en longitudes de surco de 100–120 m y se aplican láminas no excesivas ni deficitarias (100–130 mm por riego) en tiempos de avance de 20–24 horas.
3. El riego con caudal reducido por surco alterno presenta ventajas ambientales frente al surco continuo puesto que el gasto de agua se reduce aproximadamente a la mitad y se obtienen toneladas de caña por hectárea similares.

## Agradecimientos

Los autores expresan sus agradecimientos a Guillermo Ramírez, Gustavo Barona, Miller Vélez, Higinio Mina y Diógenes Arango, de Riopaila Castilla; a Eliseo Nossa y Alejandro Durán, del Ingenio Pichichí; a Luis Guillermo Molinares, de Agropecuaria El Japón y Molinares y Cía. S.C.A.; al personal técnico y de campo de Cenicaña; al Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural y en general al personal de los ingenios azucareros y a los cultivadores de caña de azúcar donantes de Cenicaña.

## **Referencias bibliográficas**

- Bohórquez, C.; García G.A. 1985. El riego por chorrillo. FONAIAP Divulga. Vol. 2 (18): 14-15.
- Campos Rivera, A.; Cruz Bermúdez, D.M.; Torres, J.S. 2009. Riego con caudal reducido. p.280-288. En: Congreso de la Asociación Colombiana de Técnicos de la Caña de Azúcar, 8. Memorias. Cali. Colombia. 16-18 septiembre de 2009. Tecnicaña, Cali, Colombia.
- Cenicaña (Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia). 2010. Informe anual 2009. Cenicaña, Cali, Colombia. 118 p.
- Díaz Ospina, D.; Prieto Paternina, C.A. 2000. Diseño y evaluación de un sistema de riego por surcos con caudal reducido. Tesis Ingeniero Agrícola. Universidad Nacional-Universidad del Valle. Palmira. 115 p.
- Quintero Durán, R.; García Sánchez, A.; Cortés Lombana, A.; Muñoz Arboleda, F.; Torres, J.S.; Carbonell González, J.; Osorio, C.A. 2008. Grupos homogéneos de suelos del área dedicada al cultivo de la caña de azúcar en el valle del río Cauca (segunda aproximación). Cenicaña, Cali, Colombia. 106 p. (Serie Técnica, no.37)
- Sotelo G. 1974. Hidráulica General. Vol I. Fundamentos. Limusa. México. 551 p.
- Torres, J.S.; Cruz Valderrama, R.; Gómez, A.; Londoño, J.D.; Campos Rivera, A.; Caicedo Ángel, J.H. 2009. Afinamiento y validación de los grupos de humedad usados en la zonificación agroecológica. Cenicaña, Cali, Colombia. 12 p. (Documento de Trabajo, 696)
- Torres, J.S.; Cruz Valderrama, R.; Villegas T., F. 2004. Avances técnicos para la programación y el manejo del riego en caña de azúcar. Segunda edición. Cenicaña, Cali, Colombia. 66 p. (Serie Técnica, no.33)

***Nuestro gran compromiso es cuidar el agua, regalo de la naturaleza esencial para la vida***

# Resultados de la primera soca de la prueba regional en zonas secas-semisecas con variedades de las Series 97 al 01

Fredy A. Salazar, Luis Orlando López, Carlos A. Viveros, Juan C. Angel, Ulises Castro y Jorge I. Victoria K.\*

## Introducción

La selección de variedades de caña de azúcar para las zonas secas-semisecas se lleva a cabo en sitios representativos de 73 zonas agroecológicas (cuarta aproximación) ubicadas en la parte plana del valle geográfico del río Cauca, las cuales se caracterizan por condiciones de humedad H0, H1 y H2.

Las variedades para las zonas secas-semisecas son seleccionadas por su adaptación en las condiciones mencionadas y con ellas se busca superar estadísticamente al testigo comercial en 5% en el contenido de sacarosa (% caña) y mantener el tonelaje de caña por hectárea. Además, las variedades seleccionadas deben mostrar resistencia a las principales enfermedades y plagas que afectan el cultivo en el valle del río Cauca.

En la prueba regional se evalúan las mejores variedades de cada una de las series de selección mediante observaciones detalladas de su comportamiento agrónomo, fitosanitario y entomológico en campos de diferentes ingenios y en las zonas agroecológicas más representativas de la agroindustria. Por lo general la prueba regional se siembra en franjas repetidas con la orientación de una siembra comercial y se hacen tres cortes (plantilla y dos socas). Con la información colectada y con el enfoque de agricultura específica por sitio se buscan los sitios o zonas agroecológicas de adaptación para las variedades sobresalientes, en donde ellas expresen su mayor potencial de producción de toneladas de caña y sacarosa.

A continuación se presentan los resultados de la primera soca de la prueba regional con variedades de las series 97-01; para el análisis se utilizaron modelos estadísticos multivariados validados en caña de azúcar (Salazar y Victoria, 2010). El experimento está diseñado para tres cortes: plantilla y dos socas.

## Materiales y métodos

La prueba regional fue sembrada durante el segundo semestre de 2007 en seis localidades de igual número de ingenios, ubicadas en cuatro zonas agroecológicas representativas del ambiente seco-semiseco. La cosecha de la plantilla se realizó entre septiembre de 2008 y enero de 2009; la primera soca se cosechó entre octubre de 2009 y febrero de 2010, con edades de corte que oscilaron entre 12.8 y 13.8 meses.

**Sitios de evaluación de la prueba regional.** El experimento se realiza en cooperación con los ingenios Incauca, Manuelita, Mayagüez, Providencia, Riopaila Castilla (planta Riopaila) y Sancarlos. Los sitios de siembra corresponden a la zona agroecológica más representativa de cada ingenio y fueron escogidos buscando la mayor cobertura de zonas agroecológicas de características secas-semisecas a través de los ingenios (Cuadro 1).

**Variedades de caña de azúcar.** Se evalúan 17 variedades promisorias de las series 97-01: dos variedades de la serie 97, una de la serie 98, una de la serie 99, cinco de la serie 00 y ocho de la serie 01. Los testigos comerciales son CC 85-92 y MZC 74-275.

Cuadro 1. Sitios de la prueba regional en zonas secas-semisecas con variedades de las series 97-01 y edades de cosecha correspondientes a la primera soca.

Ingenio	Hacienda y suerte	Zona agroecol.	Suelo			Edad de corte (meses)
			Consociación	Subgrupo	Familia textural	
Manuelita	La Cabaña 20A	11H1	Palmira	Pachic Haplustolls	Francosa fina	13.8
Riopaila	La Luisa 05	15H1	La selva	Vertic Haplustolls	Limosa fina sobre arcillosa	13.0
Sancarlos	Esmeralda 87A	6H1	Corintias	Typic Haplusterts	Fina	13.0
Providencia	Marsella 506	6H1	Galpón	Typic Calciusterts	Fina	12.8
			Corintias	Typic Haplusterts	Fina	
Mayagüez	San Rafael 41B	11H1	Palmira	Pachic Haplustolls	Francosa fina	12.9
Incauca	San Fernando 11Z	11H3	Manolo	Udifulventic Haplustolls	Francosa fina	13.1

\* Ingeniero Agrónomo, Ph.D., Fitomejorador <fsalazar@cenicana.org>; Ingeniero Agrónomo, Investigador Temporal <lolopez@cenicana.org>; Ingeniero Agrónomo, M.Sc., Fitomejorador <caviveros@cenicana.org>; Ingeniero Agrónomo, M.Sc., Fitopatólogo <jcangel@cenicana.org>; Ingeniero Agrónomo, M.Sc., Entomólogo <ucastro@cenicana.org>; Ingeniero Agrónomo, Ph.D., Director Programa de Variedades <jivictoria@cenicana.org>. Todos de Cenicaña.

**Diseño experimental.** La prueba regional fue sembrada en un diseño de látice 4x5 con tres repeticiones. La unidad experimental corresponde a cada una de las variedades en una parcela de seis surcos a lo largo del tablón (longitudes de surco entre 70 m y 122 m y distancias entre surcos de 1.65 m ó 1.70 m).

**Manejo agronómico.** La fertilización fue recomendada por Cenicaña de acuerdo con el Sistema Experto de Fertilización (SEF) y los riegos fueron programados por cada ingenio con la metodología de balance hídrico. La plantilla se cosechó en verde limpio y la primera soca con quema previa, y en ambas oportunidades el corte fue manual.

**Diseño estadístico.** Las diferencias entre tratamientos fueron analizadas con base en el análisis de varianza siguiendo el modelo estadístico para los diseños en látice.

El análisis de varianza en la soca se hizo individual para cada uno de los seis ingenios donde se lleva a cabo la prueba regional. En el análisis de medias se usó la Diferencia Mínima Significativa (DMS), con una probabilidad del 5%. La repetibilidad entre cortes se estimó usando la metodología propuesta por Cruz (2001). Para el análisis de estabilidad y adaptabilidad se usó el modelo de efectos principales aditivos e interacciones multiplicativas (*Additive Main Effects and Multiplicative Interaction*: AMMI) propuesto por Vargas *et al.* (1991).

## Resultados y discusión

A continuación se presenta el análisis de los resultados de productividad de las variedades en la primera soca en términos de sacarosa (% caña), toneladas de sacarosa por hectárea (TSH) y toneladas de caña por hectárea (TCH). Para el efecto se hizo el análisis de las medias de cada variable en cada localidad y el análisis combinado de las medias a través de localidades, así como el análisis de estabilidad de las variedades a través de los ambientes de evaluación.

El desarrollo de las variedades en la primera soca se vio afectado por las condiciones de alta humedad que se presentaron en la mayoría de los sitios durante la cosecha de la plantilla –cuando hubo pisoteo de las cepas– y por la cantidad de residuos dejados en el campo por el corte manual y en verde limpio. Estas condiciones incidieron negativamente en el rebrote de la soca y conllevaron porcentajes de resiembra cercanos al 20% en casi todas las variedades, incluida la variedad testigo CC 85-92. Adicionalmente, durante el desarrollo de la primera soca se presentó un período de sequía prolongado, de manera que los tonelajes de caña por hectárea de las variedades fueron menores en la primera soca con respecto a los resultados obtenidos en la plantilla (Viveros *et al.*, 2009).

## Análisis por localidad

Como criterio de análisis se presume que las mejores variedades son aquellas que superan de manera significativa en 5% la productividad media obtenida por el testigo CC 85-92 en cada sitio experimental, es decir las variedades que se ubican en el cuadrante superior derecho de la figura de isocurvas. Para la identificación de las variedades promisorias se analizan las combinaciones de sacarosa (% caña) y TCH que dan lugar a los resultados en TSH y se tienen en cuenta las evaluaciones sanitarias.

### Zona agroecológica 11H1, Ingenio Manuelita

En el Ingenio Manuelita, hacienda La Cabaña, zona agroecológica 11H1, se cosechó la primera soca con una edad de 13.8 meses. Durante el ciclo del cultivo se presentó una precipitación de 1139 mm y se aplicaron cinco riegos suplementarios.

Los coeficientes de variación para las variables sacarosa (% caña), TCH y TSH fueron bajos (5.2%, 5% y 6.1%, respectivamente) y los coeficientes de heredabilidad fueron superiores al 92%, de modo que el control del error experimental fue adecuado. En el análisis de varianza se encontraron diferencias estadísticas altamente significativas entre las variedades, lo cual refleja las diferencias genéticas entre las variedades. En las pruebas de comparación de medias (DMS, 0.05 y Dunnett, 0.05) se detectaron diferencias estadísticas entre las variedades y entre estas y el testigo CC 85-92 (Cuadro 2).

Con diferencias estadísticas significativas con respecto al testigo CC 85-92 se destacaron en sacarosa (% caña) las variedades CC 01-678 (22% de diferencia), CC 01-746 (16%), CC 00-3191 (13%) y CC 01-1228 (12%) y en TSH las variedades CC 01-678 (17% de diferencia), CC 97-7170 (13%) y CC 01-1228 (11%). En TCH ninguna variedad fue estadísticamente superior al testigo, aunque CC 97-7170 presentó una diferencia de 5% y CC 01-1228, CC 01-678, CC 01-1305 y CC 99-1405 fueron similares al testigo (Figura 1).

*Como criterio de análisis se presume que las mejores variedades son aquellas que superan de manera significativa en 5% la productividad media obtenida por el testigo CC 85-92 en cada sitio experimental, es decir, las variedades que se ubican en el cuadrante superior derecho de la figura de isocurvas*



Cuadro 2. Estadísticas descriptivas generales del experimento de prueba regional con variedades de las series 97-01 para zonas secas-semisecas en primera soca, medias de las variedades sobresalientes y los testigos. Hacienda La Cabaña, suerte 20A, Ingenio Manuelita, zona agroecológica 11H1.

Variedad	Sacarosa (% caña)		Toneladas de caña por hectárea (TCH)		Toneladas de sacarosa por hectárea (TSH)		Toneladas de azúcar por hectárea (TAH)	
	Media	MT (%) <sup>a</sup>	Media	MT (%) <sup>a</sup>	Media	MT (%) <sup>a</sup>	Media	MT (%) <sup>a</sup>
CC 01-678	16.8	22**	156	-2	25.9	17**	23.3	24**
CC 97-7170	15.0	9*	167	5	25.1	13**	21.8	16**
CC 01-1228	15.5	12**	155	-2	24.4	11*	21.4	14**
CC 98-426	15.4	11**	147	-8*	23.0	4	20.0	6
CC 01-746	15.9	16**	145	-9*	22.8	3	20.2	7
MZC 74-275 <sup>b</sup>	15.5	12**	143	-10**	22.6	2	19.8	5
CC 85-92 <sup>b</sup>	13.8	0	159	0	22.1	0	18.8	0
Media	15.0		146		21.9		19.0	
Mínimo	13.2		120		18.0		14.8	
Máximo	16.8		167		25.9		23.3	
DMS <sup>c</sup>	1.3		13		2.2		2.2	
CV (%) <sup>d</sup>	5.2		5		6.1		7.0	
p variedades <sup>e</sup>	0.0		0		0.0		0.0	
H <sup>2</sup> (%) <sup>f</sup>	92		95		95		95	

- a. MT (%): Porcentaje de ganancia relativa sobre el testigo CC 85-92.  
 \* Significancia estadística (al 5%) para la diferencia entre la variedad y el testigo CC 85-92.  
 \*\* Significancia estadística (al 1%) para la diferencia entre la variedad y el testigo CC 85-92.  
 b. Variedades testigo. Las diferencias relativas de las variedades evaluadas se presentan con respecto al testigo CC 85-92.  
 c. DMS: Diferencia mínima significativa (p=5%).  
 d. CV (%): Coeficiente de variación del experimento.  
 e. p variedades: Probabilidad de encontrar diferencias estadísticas significativas entre variedades.  
 f. H<sup>2</sup> (%): Coeficiente de heredabilidad, como porcentaje de la varianza fenotípica que se debe a efectos genéticos estimables.

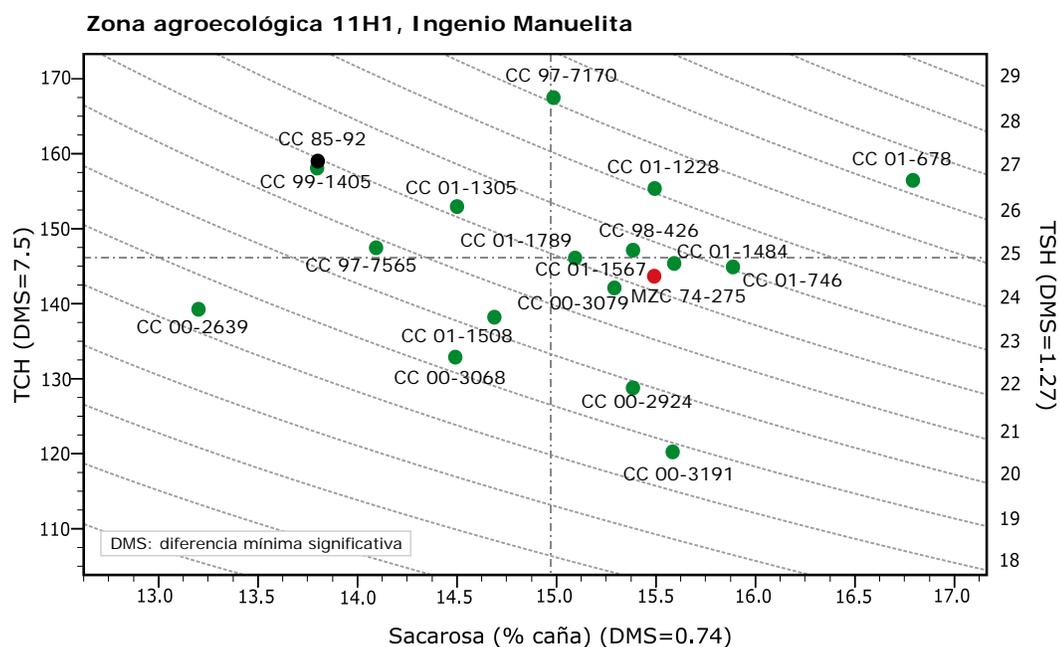


Figura 1. Curvas de isoproductividad de la prueba regional en zonas secas-semisecas con variedades de las series 97-01. Ingenio Manuelita, zona agroecológica 11H1. Edad de cosecha: 13.8 meses (primera soca).

## ● Zona agroecológica 15H1, Riopaila Castilla (planta Riopaila)

En la hacienda La Luisa, zona agroecológica 15H1, la primera soca se cosechó a los 13.0 meses. Durante el ciclo de cultivo la precipitación fue de 1186 mm, lo que implicó la aplicación de tres riegos suplementarios.

Los coeficientes de variación para las variables evaluadas fueron bajos, con valores entre 4.2% y 6.5%, y que los coeficientes de heredabilidad fueron superiores a 86%; esto indica un control adecuado del error experimental que a su vez permite hacer una mejor evaluación de la variabilidad genética. En el análisis de varianza se detectaron diferencias altamente significativas entre las variedades evaluadas. Las pruebas de separación de medias de DMS (0.05) y Dunnett (0.05) contribuyeron en la detección de diferencias estadísticas significativas entre las variedades y entre estas y el testigo CC 85-92 (Cuadro 3).

Seis variedades superaron significativamente en sacarosa (% caña) al testigo CC 85-92: CC 98-426 (en 15%), CC 01-1484 (15%), CC 01-678 (12%), CC 00-3191 (12%), CC 97-7170 (11%) y CC 00-2924 (10%). En TCH y TSH todas las variedades fueron iguales en términos estadísticos al testigo CC 85-92; sobresalieron por el tonelaje de caña CC 01-1567 y por el tonelaje de sacarosa CC 01-1484 (9%), CC 00-2924 (9%), CC 97-7170 (8%) y CC 01-678 (5%) (Figura 2).



CC 01-678

Cuadro 3. Estadísticas descriptivas generales del experimento de prueba regional con variedades de las series 97-01 para zonas secas-semisecas en primera soca, medias de las variedades sobresalientes y los testigos. Hacienda La Luisa, suerte 05, Riopaila Castilla (planta Riopaila), zona agroecológica 15H1.

Variedad	Sacarosa (% caña)		Toneladas de caña por hectárea (TCH)		Toneladas de sacarosa por hectárea (TSH)		Toneladas de azúcar por hectárea (TAH)	
	Media	MT (%) <sup>a</sup>	Media	MT (%) <sup>a</sup>	Media	MT (%) <sup>a</sup>	Media	MT (%) <sup>a</sup>
CC 00-2924	16.2	10**	121	-2	19.7	9	17.2	10
CC 01-1484	16.9	15**	117	-5	19.6	9	17.6	13*
CC 97-7170	16.3	11**	120	-3	19.6	8	17.6	13*
CC 01-1567	15.4	5	124	1	19.5	8	17.2	10
CC 01-678	16.5	12**	115	-7*	19.0	5	17.1	9
CC 98-426	16.9	15**	112	-9**	18.9	4	17.0	9
MZC 74-275 <sup>b</sup>	16.0	9*	117	-5	18.7	3	16.5	5
CC 85-92 <sup>b</sup>	14.7	0	123	0	18.1	0	15.6	0
Media	15.7		116		18.3		16.2	
Mínimo	13.9		102		14.2		12.1	
Máximo	16.9		124		19.7		17.6	
DMS <sup>c</sup>	1.1		9		2.0		2.0	
CV (%) <sup>d</sup>	4.2		5		6.5		7.3	
p variedades <sup>e</sup>	0.0		0		0.0		0.0	
H <sup>2</sup> (%) <sup>f</sup>	93		86		90		91	

a. MT (%): Porcentaje de ganancia relativa sobre el testigo CC 85-92.

\* Significancia estadística (al 5%) para la diferencia entre la variedad y el testigo CC 85-92.

\*\* Significancia estadística (al 1%) para la diferencia entre la variedad y el testigo CC 85-92.

b. Variedades testigo. Las diferencias relativas de las variedades evaluadas se presentan con respecto al testigo CC 85-92.

c. DMS: Diferencia mínima significativa (p=5%).

d. CV (%): Coeficiente de variación del experimento.

e. p variedades: Probabilidad de encontrar diferencias estadísticas significativas entre variedades.

f. H<sup>2</sup> (%): Coeficiente de heredabilidad, como porcentaje de la varianza fenotípica que se debe a efectos genéticos estimables.

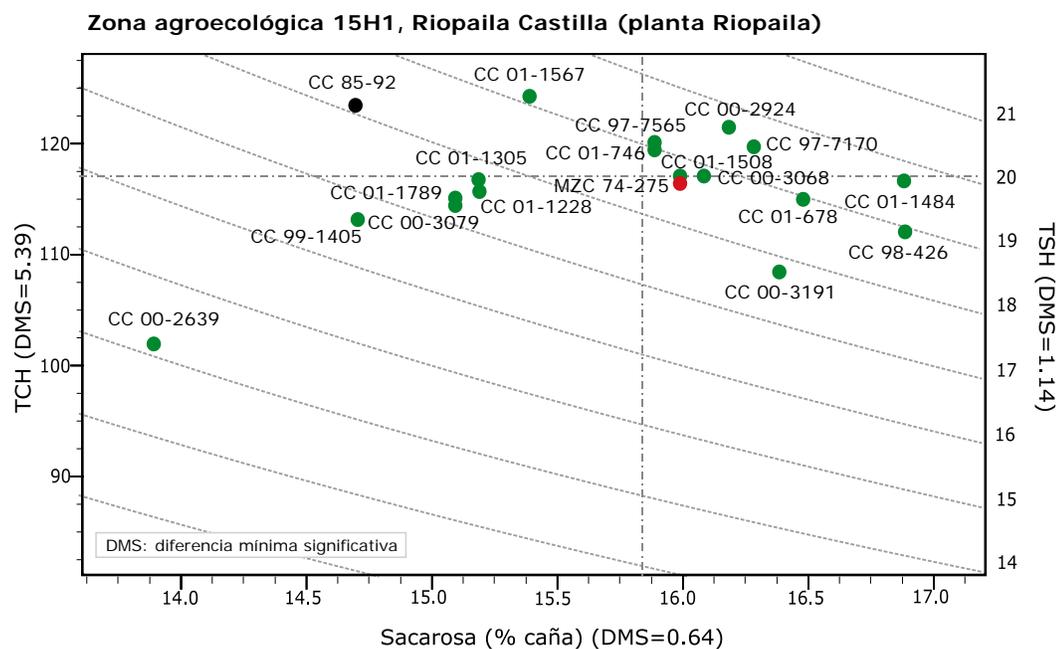


Figura 2. Curvas de isoproductividad de la prueba regional en zonas secas-semisecas con variedades de las series 97-01. Riopaila Castilla (planta Riopaila), zona agroecológica 15H1. Edad de cosecha: 13.0 meses (primera soca).



CC 01-678

## Zona agroecológica 6H1, Ingenio Sancarlos

En el Ingenio Sancarlos, hacienda Esmeralda, zona agroecológica 6H1, la primera soca se cosechó a los 13 meses. Durante el ciclo de cultivo se registraron 945 mm de precipitación y fueron necesarios ocho riegos suplementarios.

Los coeficientes de variación para TCH y TSH estuvieron entre 13.0% y 14.4%, y para sacarosa (% caña) el coeficiente de variación fue de 4.1%. Las heredabilidades fueron superiores al 91% en las tres variables evaluadas, lo cual indica un control adecuado del error experimental y por tanto una mejor estimación de la variabilidad genética. En el análisis de varianza se detectaron diferencias altamente significativas entre las variedades evaluadas. En las pruebas de separación de medias (DMS, 0.05 y Dunnett, 0.05) se detectaron diferencias estadísticas significativas entre variedades y entre estas y el testigo CC 85-92 (Cuadro 4).

En sacarosa (% caña) y por superar significativamente al testigo CC 85-92 se destacaron las variedades CC 98-426 (18% más sacarosa), CC 00-3191 (14%), CC 00-2924 (13%), CC 97-7170 (13%), CC 01-1305 (13%) y CC 01-1598 (12%). En TCH y TSH ninguna de las variedades superó significativamente al testigo; sobresalieron en TCH las variedades CC 00-3079 (4%) y CC 01-746 (1%), mientras que en TSH se destacaron CC 01-746 (13%), CC 99-1405 (7%), CC 00-3079 (7%) y CC 01-1228 (1%) (Figura 3).



CC 01-1228 y CC 85-92

Cuadro 4. Estadísticas descriptivas generales del experimento de prueba regional con variedades de las series 97-01 para zonas secas-semisecas en primera soca, medias de las variedades sobresalientes y los testigos. Hacienda Esmeralda, suerte 87A, Ingenio Sancarlos, zona agroecológica 6H1.

Variedad	Sacarosa (% caña)		Toneladas de caña por hectárea (TCH)		Toneladas de sacarosa por hectárea (TSH)		Toneladas de azúcar por hectárea (TAH)	
	Media	MT (%) <sup>a</sup>	Media	MT (%) <sup>a</sup>	Media	MT (%) <sup>a</sup>	Media	MT (%) <sup>a</sup>
CC 01-746	14.6	7	125	1	19.1	13	15.2	-7
CC 99-1405	14.4	5	125	0	18.1	7	17.3	6
CC 00-3079	14.2	4	129	4	18.0	7	17.6	8
CC 01-1228	14.5	6	124	0	17.0	1	18.6	14
CC 01-1305	15.4	13**	111	-11	16.9	0	15.5	-4
MZC 74-275 <sup>b</sup>	14.6	7	110	-12	15.5	-8	15.3	-6
CC 85-92 <sup>b</sup>	13.6	0	124	0	16.9	0	16.3	0
Media	14.5		107		15.6		14.9	
Mínimo	12.3		80		10.4		10.6	
Máximo	16.1		129		19.1		18.6	
DMS <sup>c</sup>	0.94		23		3.02		3.43	
CV (%) <sup>d</sup>	4.1		13		14.4		13.9	
p variedades <sup>e</sup>	0.00		0		0.00		0.00	
H <sup>2</sup> (%) <sup>f</sup>	95		92		91		91	

a. MT (%): Porcentaje de ganancia relativa sobre el testigo CC 85-92.

\* Significancia estadística (al 5%) para la diferencia entre la variedad y el testigo CC 85-92.

\*\* Significancia estadística (al 1%) para la diferencia entre la variedad y el testigo CC 85-92.

b. Variedades testigo. Las diferencias relativas de las variedades evaluadas se presentan con respecto al testigo CC 85-92.

c. DMS: Diferencia mínima significativa (p=5%).

d. CV (%): Coeficiente de variación del experimento.

e. p variedades: Probabilidad de encontrar diferencias estadísticas significativas entre variedades.

f. H<sup>2</sup> (%): Coeficiente de heredabilidad, como porcentaje de la varianza fenotípica que se debe a efectos genéticos estimables.

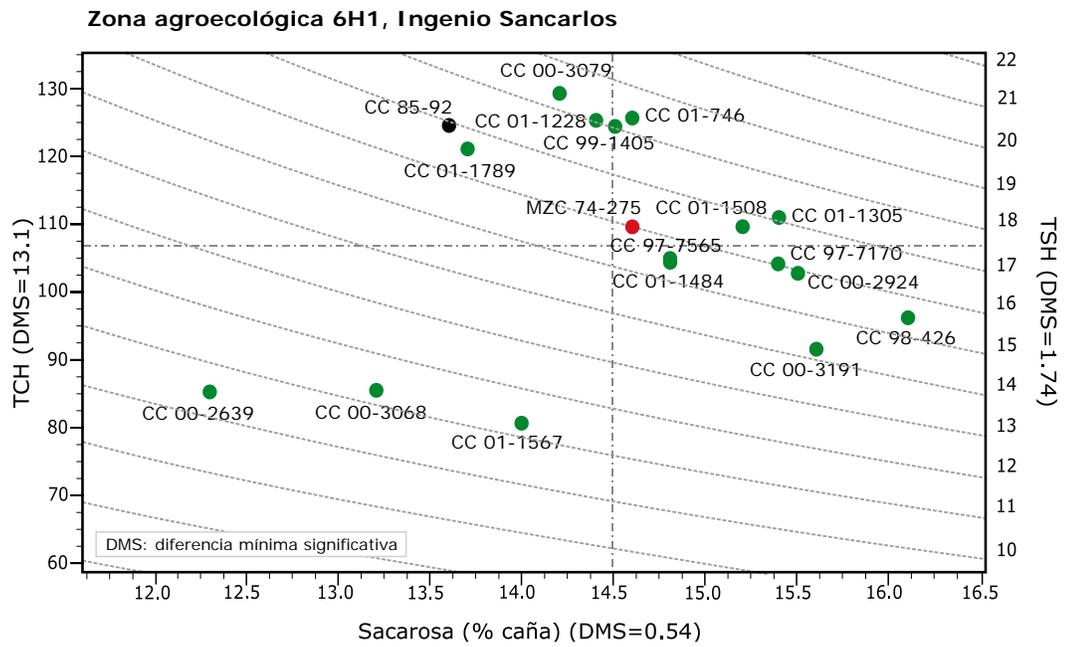


Figura 3. Curvas de isoproductividad de la prueba regional en zonas secas-semisecas con variedades de las series 97-01. Ingenio Sancarlos, zona agroecológica 6H1. Edad de cosecha: 13.0 meses (primera soca).



CC 01-1228



## Zona agroecológica 6H1, Ingenio Providencia

En el Ingenio Providencia, hacienda Marsella, zona agroecológica 6H1, la primera soca se cosechó a los 12.8 meses de edad. Durante el ciclo de cultivo la precipitación fue 596 mm, de modo que se aplicaron diez riegos suplementarios.

Los coeficientes de variación para las variables evaluadas fueron bajos (4.4-9.3%) y los coeficientes de heredabilidad estuvieron entre 82% y 88%; lo anterior indica un control adecuado del error experimental y por lo tanto, mejor evaluación de la variabilidad genética de las variedades. En el análisis de varianza se detectaron diferencias altamente significativas entre las variedades y entre las variables TCH y TSH. En las pruebas de separación de medias (DMS, 0.05 y Dunnett, 0.05) se detectaron diferencias estadísticas significativas entre variedades y entre estas y el testigo CC 85-92 (Cuadro 5).

Con diferencias significativas en sacarosa (% caña) en comparación con el testigo se identificaron las variedades CC 99-1405 (8%) y CC 01-1228 (7%); además se destacaron en esta variable CC 97-7170 (6%), CC 01-3191 (5%), CC 98-426 (4%) y CC 01-746 (4%). En TCH y TSH ninguna variedad fue superior en términos estadísticos al testigo. Sólo las variedades CC 97-7170 y CC 01-1228 fueron levemente mejores en TSH, con diferencias de 2% y 1% respectivamente (Figura 4).



CC 97-7170

Cuadro 5. Estadísticas descriptivas generales del experimento de prueba regional con variedades de las series 97-01 para zonas secas-semisecas en primera soca, medias de las variedades sobresalientes y los testigos. Hacienda Marsella, suerte 506, Ingenio Providencia, zona agroecológica 6H1.

Variedad	Sacarosa (% caña)		Toneladas de caña por hectárea (TCH)		Toneladas de sacarosa por hectárea (TSH)		Toneladas de azúcar por hectárea (TAH)	
	Media	MT (%) <sup>a</sup>	Media	MT (%) <sup>a</sup>	Media	MT (%) <sup>a</sup>	Media	MT (%) <sup>a</sup>
CC 97-7170	15.7	6	145	-4	19.9	2	22.6	0
CC 01-1228	15.8	7*	141	-7	19.7	1	22.3	-1
CC 99-1405	16.0	8*	132	-13*	18.6	-5	21.1	-6
CC 01-1789	14.6	-1	139	-8	18.1	-7	20.8	-7
CC 01-3191	15.6	5	133	-12*	17.8	-9	20.3	-9
MZC 74-275 <sup>b</sup>	14.5	-2	124	-18**	15.4	-21**	17.8	-21**
CC 85-92 <sup>b</sup>	14.8	0	151	0	19.6	0	22.5	0
Media	15.0		132		17.3		19.8	
Mínimo	14.4		116		14.4		16.8	
Máximo	16.0		151		19.9		22.6	
DMS <sup>c</sup>	1.1		18		2.7		2.9	
CV (%) <sup>d</sup>	4.4		8		9.3		8.9	
p variedades <sup>e</sup>	0.1		0.0		0.0		0.0	
H <sup>2</sup> (%) <sup>f</sup>	82		86		88		88	

a. MT (%): Porcentaje de ganancia relativa sobre el testigo CC 85-92.

\* Significancia estadística (al 5%) para la diferencia entre la variedad y el testigo CC 85-92.

\*\* Significancia estadística (al 1%) para la diferencia entre la variedad y el testigo CC 85-92.

b. Variedades testigo. Las diferencias relativas de las variedades evaluadas se presentan con respecto al testigo CC 85-92.

c. DMS: Diferencia mínima significativa (p=5%).

d. CV (%): Coeficiente de variación del experimento.

e. p variedades: Probabilidad de encontrar diferencias estadísticas significativas entre variedades.

f. H<sup>2</sup> (%): Coeficiente de heredabilidad, como porcentaje de la varianza fenotípica que se debe a efectos genéticos estimables.

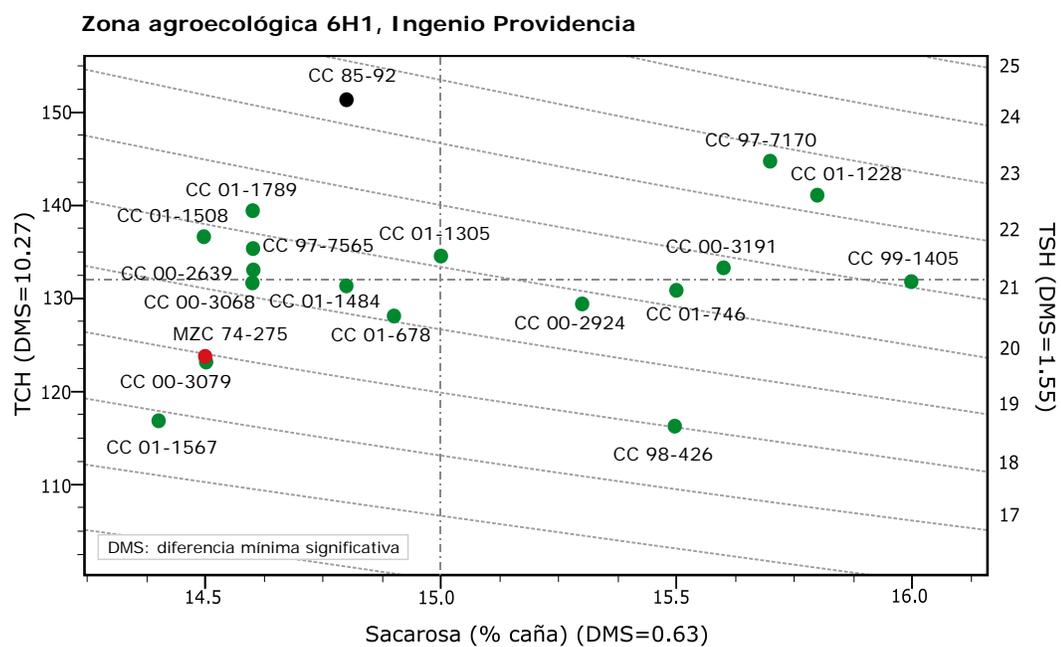


Figura 4. Curvas de isoproductividad de la prueba regional en zonas secas-semisecas con variedades de las series 97-01. Ingenio Providencia, zona agroecológica 6H1. Edad de cosecha: 12.8 meses (primera soca).



CC 97-7170



## Zona agroecológica 11H1, Ingenio Mayagüez

En el Ingenio Mayagüez, hacienda San Rafael, zona agroecológica 11H1, la primera soca se cosechó a la edad de 12.9 meses. La precipitación durante el ciclo del cultivo fue 741 mm y se aplicaron cinco riegos adicionales de acuerdo con el balance hídrico.

Para las variables evaluadas los coeficientes de variación fueron bajos (4.4-6.6%), acompañados de heredabilidades superiores al 92%, lo cual indica un adecuado control del error experimental que permite evaluar la variabilidad genética entre las variedades. En el análisis de varianza se detectaron diferencias estadísticas altamente significativas entre las variedades para todos los caracteres en evaluación. En la prueba de comparación de medias (DMS, 0.05 y Dunnett, 0.05) se detectaron diferencias significativas entre las variedades y entre las variedades y el testigo CC 85-92 (Cuadro 6).



CC 00-3079

Por su alta sacarosa (% caña), significativamente superior que el testigo CC 85-92, sobresalieron las variedades CC 01-1484 (10% más de sacarosa), CC 98-426 (9%), CC 00-2924 (8%); también se destacaron CC 97-7170 (5%), CC 00-3079 (5%) y CC 00-2639 (4%). En TCH, la variedad CC 00-2639 fue significativamente superior al testigo, con una diferencia de 14%; las variedades CC 01-1305, CC 01-1789 y CC 97-7170 presentaron valores de TCH estadísticamente iguales a CC 85-92. En TSH también sobresalió la CC 00-2639, que fue significativamente superior en 22% al testigo CC 85-92; otras variedades destacadas en esta variable fueron CC 01-1484 (3%) y CC 97-7170 (1%) (Figura 5).

Cuadro 6. Estadísticas descriptivas generales del experimento de prueba regional con variedades de las series 97-01 para zonas secas-semisecas en primera soca, medias de las variedades sobresalientes y los testigos. Hacienda San Rafael, suerte 41B, Ingenio Mayagüez, zona agroecológica 11H1.

Variedad	Sacarosa (% caña)		Toneladas de caña por hectárea (TCH)		Toneladas de sacarosa por hectárea (TSH)		Toneladas de azúcar por hectárea (TAH)	
	Media	MT (%) <sup>a</sup>	Media	MT (%) <sup>a</sup>	Media	MT (%) <sup>a</sup>	Media	MT (%) <sup>a</sup>
CC 00-2639	15.6	4	182	14**	28.6	20**	25.4	22**
CC 01-1484	16.6	10*	149	-7	24.6	3	22.1	6
CC 97-7170	15.8	5	154	-4	24.0	1	21.2	2
CC 00-3079	15.8	5	150	-6	23.7	0	21.0	1
CC 97-7565	15.2	1	154	-3	23.6	-1	20.8	0
MZC 74-275 <sup>b</sup>	15.6	3	149	-7	23.2	-2	20.7	-1
CC 85-92 <sup>b</sup>	15.1	0	159	0	23.8	0	20.8	0
Media	15.3		148		22.7		19.9	
Mínimo	13.6		127		18.6		15.8	
Máximo	16.6		182		28.6		25.4	
DMS <sup>c</sup>	1.1		13		2.5		2.4	
CV (%) <sup>d</sup>	4.4		5		6.6		7.4	
p variedades <sup>e</sup>	0.0		0		0.0		0.0	
H <sup>2</sup> (%) <sup>f</sup>	92		97		95		95	

a. MT (%): Porcentaje de ganancia relativa sobre el testigo CC 85-92.

\* Significancia estadística (al 5%) para la diferencia entre la variedad y el testigo CC 85-92.

\*\* Significancia estadística (al 1%) para la diferencia entre la variedad y el testigo CC 85-92.

b. Variedades testigo. Las diferencias relativas de las variedades evaluadas se presentan con respecto al testigo CC 85-92.

c. DMS: Diferencia mínima significativa (p=5%).

d. CV (%): Coeficiente de variación del experimento.

e. p variedades: Probabilidad de encontrar diferencias estadísticas significativas entre variedades.

f. H<sup>2</sup> (%): Coeficiente de heredabilidad, como porcentaje de la varianza fenotípica que se debe a efectos genéticos estimables.

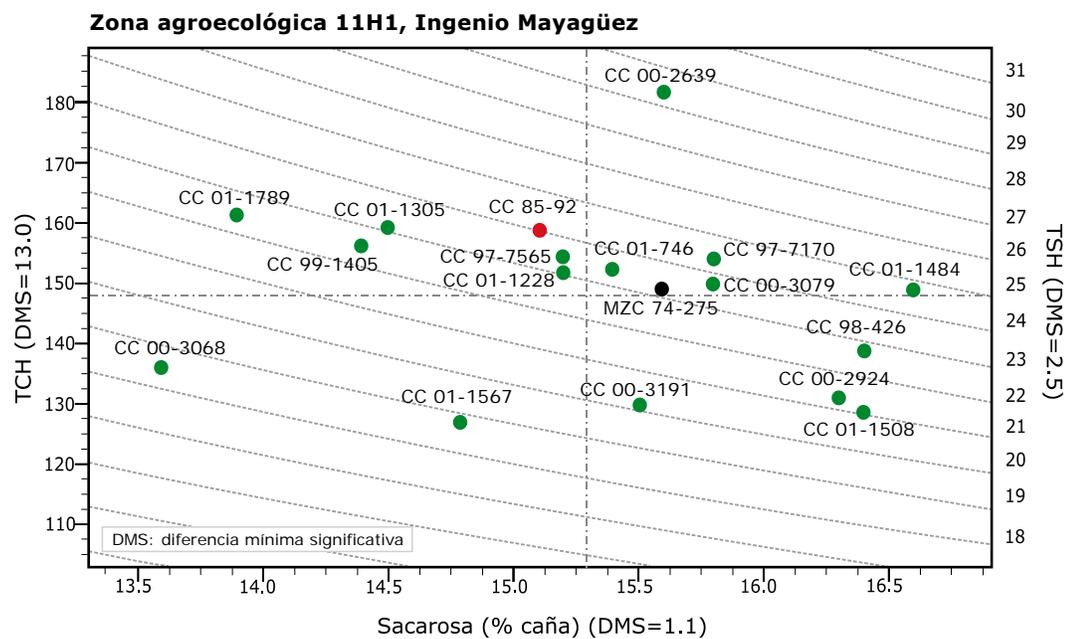


Figura 5. Curvas de isoproductividad de la prueba regional en zonas secas-semisecas con variedades de las series 97-01. Ingenio Mayagüez, zona agroecológica 11H1. Edad de cosecha: 12.9 meses (primera soca).



CC 00-3079



## Zona agroecológica 11H3, Incauca

En Incauca, hacienda San Fernando, la primera soca se cosechó a los 13.1 meses de edad. Dadas las condiciones de humedad presentes durante el desarrollo del cultivo, el sitio fue reclasificado en tiempo real en la zona agroecológica 11H1 (la zona agroecológica reportada en la cartografía es 11H3). Durante el ciclo de cultivo se registraron 696 mm de precipitación y fueron necesarios cuatro riegos adicionales.

Los coeficientes de variación para las variables evaluadas fueron bajos (entre 5.4% y 9.6%) y las heredabilidades fueron superiores a 87%, lo cual indica un buen control del error experimental que permite hacer una evaluación adecuada de la variabilidad genética. En el análisis de varianza se detectaron diferencias altamente significativas entre las variedades evaluadas. En las pruebas de separación de medias (DMS, 0.05 y Dunnett, 0.05) se detectaron diferencias significativas entre variedades y entre estas y el testigo CC 85-92 (Cuadro 7).

En sacarosa (% caña) se consiguieron resultados significativamente superiores al testigo CC 85-92 con las variedades CC 98-426 (16%), CC 01-1228 (15%), CC 01-678 (10%) y CC 97-7565 (10%). En TCH ninguna variedad fue superior en términos estadísticos, aunque sobresalieron CC 01-1305 (2%) y CC 00-2639 (igual que el testigo). En TSH sobresalió la variedad CC 01-1228 con 14% de diferencia estadística significativa en comparación con el testigo; también se destacaron en esta variable CC 01-678 (7%), CC 01-1789 (1%) y CC 01-1305 (igual que el testigo) (Figura 6).

Cuadro 7. Estadísticas descriptivas generales del experimento de prueba regional con variedades de las series 97-01 para zonas secas-semisecas en primera soca, medias de las variedades sobresalientes y los testigos. Hacienda San Fernando, suerte 11Z, Incauca, zona agroecológica 11H3.

Variedad	Sacarosa (% caña)		Toneladas de caña por hectárea (TCH)		Toneladas de sacarosa por hectárea (TSH)		Toneladas de azúcar por hectárea (TAH)	
	Media	MT (%) <sup>a</sup>	Media	MT (%) <sup>a</sup>	Media	MT (%) <sup>a</sup>	Media	MT (%) <sup>a</sup>
CC 01-1228	17.1	15**	133	-2	22.9	14*	20.6	18**
CC 01-678	16.3	10*	132	-2	21.5	7	19.1	9
CC 01-1789	15.2	3	134	-1	20.3	1	17.8	2
CC 97-7170	14.9	1	133	-1	20.0	0	17.4	0
CC 01-1305	14.4	-3	139	2	20.0	0	17.2	-1
MZC 74-275 <sup>b</sup>	14.6	-2	122	-10*	17.8	-11	15.4	-12
CC 85-92 <sup>b</sup>	14.8	0	135	0	20.0	0	17.5	-1
Media	15.4		125		19.2		16.9	
Mínimo	14.0		94		13.8		12.0	
Máximo	17.2		139		22.9		20.6	
DMS <sup>c</sup>	1.4		14		3.1		3.0	
CV (%) <sup>d</sup>	5.4		7		9.6		10.7	
p variedades <sup>e</sup>	0.00		0		0.01		0.02	
H <sup>2</sup> (%) <sup>f</sup>	89		93		87		85	

a. MT (%): Porcentaje de ganancia relativa sobre el testigo CC 85-92.

\* Significancia estadística (al 5%) para la diferencia entre la variedad y el testigo CC 85-92.

\*\* Significancia estadística (al 1%) para la diferencia entre la variedad y el testigo CC 85-92.

b. Variedades testigo. Las diferencias relativas de las variedades evaluadas se presentan con respecto al testigo CC 85-92.

c. DMS: Diferencia mínima significativa (p=5%).

d. CV (%): Coeficiente de variación del experimento.

e. p variedades: Probabilidad de encontrar diferencias estadísticas significativas entre variedades.

f. H<sup>2</sup> (%): Coeficiente de heredabilidad, como porcentaje de la varianza fenotípica que se debe a efectos genéticos estimables.

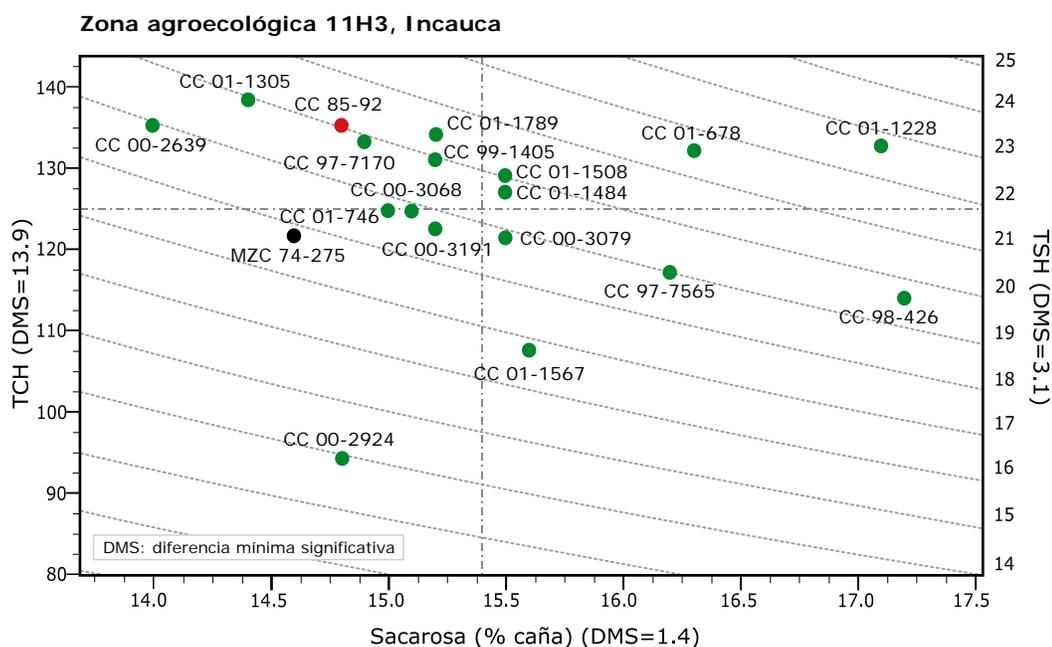


Figura 6. Curvas de isoproductividad de la prueba regional en zonas secas-semisecas con variedades de las series 97-01. Incauca, zona agroecológica 11H3. Edad de cosecha: 13.1 meses (primera soca).

### Análisis combinado a través de ingenios

El análisis combinado de los resultados de la primera soca a través de los seis ingenios donde se cosechó la prueba regional mostró coeficientes de variación bajos (entre 4.9% y 8.6%) para las variables sacarosa (% caña), TCH y TSH. Los coeficientes de heredabilidad estuvieron entre 68% y 79%, lo cual indica un manejo adecuado del error experimental en el campo.

En el análisis combinado de varianza a través de los ingenios se detectaron diferencias estadísticas altamente significativas entre las variedades y en la interacción variedades por localidad, con lo cual se ratifica que se debe continuar con el esquema de selección de variedades para zonas agroecológicas o ambientes específicos. En las pruebas de separación de medias (DMS, 0.05 y Dunnett, 0.05) se detectaron diferencias estadísticas significativas entre variedades, así como entre estas y el testigo CC 85-92 (Cuadro 8).

A través de las localidades, en la primera soca sobresalieron por contenido de sacarosa (% caña) significativamente superior al testigo las variedades CC 01-678 (11%), CC 01-1228 (7%), CC 97-7170 (7%) y CC 01-746 (6%), y se destacó la CC 99-1405 (2%). En TCH todas las variedades fueron inferiores al testigo CC 85-92. En TSH ninguna variedad superó al testigo en términos estadísticos, aunque se destacaron la CC 01-1228 (4%), la CC 01-678 (4%) y la CC 97-7170 (3%) (Figura 7).

En la Figura 8 se muestra el análisis de las dos primeras componentes principales (PCA) de la interacción de variedad por localidad (AMMI2), de modo que: (a) Las variedades más estables y los ambientes que menos discriminan las diferencias entre variedades se ubican hacia el centro de la gráfica; (b) Las variedades y las localidades que tienen una interacción positiva se ubican en el mismo cuadrante y (c) Las variedades y las localidades que tienen una interacción negativa se ubican en cuadrantes opuestos.

De acuerdo con lo anterior, el análisis de estabilidad de AMMI2 para el carácter TSH mostró que en la hacienda Marsella del Ingenio Providencia (PR) las variedades fueron afectadas de manera igual por el ambiente, mientras en las otras haciendas la interacción fue mayor; este análisis permite hacer una mejor discriminación de las variedades por TSH en cada localidad. Se observa que la hacienda San Rafael del Ingenio Mayagüez (MY) y la hacienda La Cabaña del Ingenio Manuelita (MN) se ubican en cuadrantes opuestos, tal como ocurre con la hacienda La Esmeralda del Ingenio Sancarlos (SC) y la hacienda San Fernando de Incauca (CA), lo cual indica que dichas localidades ofrecen condiciones ambientales contrastantes que permiten tener una mayor expresión de las variedades como respuesta a los cambios del ambiente (Figura 8).

La interacción variedad por ambiente fue mayor en las variedades CC 00-2639, CC 00-2924, CC 01-746, CC 01-678 y CC 00-3068, lo que indica que estas variedades deben ser ubicadas en ambientes específicos para explotar su potencial genético. Las variedades más estables a través de los ambientes fueron CC 97-7170, CC 01-1228, CC 01-1484, CC 98-426, CC 85-92 y MZC 74-275 (Figura 8).

Con base en el comportamiento *per se* de las variedades y la primera componente de interacción, las variedades más estables fueron CC 97-7170, CC 01-1228, CC 01-678 y CC 85-92 por presentar valores de TSH superiores a la media general y valores de PCA cercanos a cero (Figura 9). Las localidades de mayor potencial de producción y que permiten hacer una mejor discriminación de las variedades –debido a que presentan valores de PCA distantes de cero– corresponden a la hacienda San Rafael del Ingenio Mayagüez (MY) y la hacienda La Cabaña del Ingenio Manuelita (MN).

Cuadro 8. Estadísticas descriptivas generales del experimento de prueba regional con variedades de las series 97-01 para zonas secas-semisecas en primera soca, medias de las variedades sobresalientes y los testigos. Evaluaciones a través de seis ingenios azucareros del valle del río Cauca, Colombia.

Variedad	Sacarosa (% caña)		Toneladas de caña por hectárea (TCH)		Toneladas sacarosa por hectárea (TSH)		Toneladas de azúcar por hectárea (TAH)	
	Media	MT (%) <sup>a</sup>	Media	MT (%) <sup>a</sup>	Media	MT (%) <sup>a</sup>	Media	MT (%) <sup>a</sup>
CC 01-1228	15.5	7**	141	-3	21.4	4	20.6	7
CC 01-678	16.1	11**	139	-5	21.3	4	20.5	7
CC 97-7170	15.5	7**	141	-4	21.1	3	19.7	3
CC 01-746	15.4	6**	136	-7	20.2	-1	18.3	-4
CC 99-1405	14.7	2	140	-4	20.1	-2	18.6	-3
MZC 74-275 <sup>b</sup>	15.1	4	129	-11**	18.9	-8	17.8	-7
CC 85-92 <sup>b</sup>	14.5	0	146	0	20.5	0	19.2	0
Media	15.2		132		19.4		18.2	
Mínimo	13.9		115		16.9		15.7	
Máximo	16.2		146		21.4		20.6	
DMS <sup>c</sup>	0.7		12		2.1		2.1	
CV (%) <sup>d</sup>	4.9		8		8.6		9.2	
p variedades <sup>e</sup>	0.0		0.0		0.0		0.0	
p variedades por localidad <sup>f</sup>	0.0		0.0		0.0		0.0	
H <sup>2</sup> (%) <sup>g</sup>	79		79		68		64	

a. MT (%): Porcentaje de ganancia relativa sobre el testigo CC 85-92.

\* Significancia estadística (al 5%) para la diferencia entre la variedad y el testigo CC 85-92.

\*\* Significancia estadística (al 1%) para la diferencia entre la variedad y el testigo CC 85-92.

b. Variedades testigo. Las diferencias relativas de las variedades evaluadas se presentan con respecto al testigo CC 85-92.

c. DMS: Diferencia mínima significativa (p=5%).

d. CV (%): Coeficiente de variación del experimento.

e. p variedades: Probabilidad de encontrar diferencias estadísticas significativas entre variedades.

f. p variedades por localidad: Probabilidad de encontrar diferencias estadísticas significativas para la interacción variedades por localidad.

g. H<sup>2</sup> (%): Coeficiente de heredabilidad, como porcentaje de la varianza fenotípica que se debe a efectos genéticos estimables.

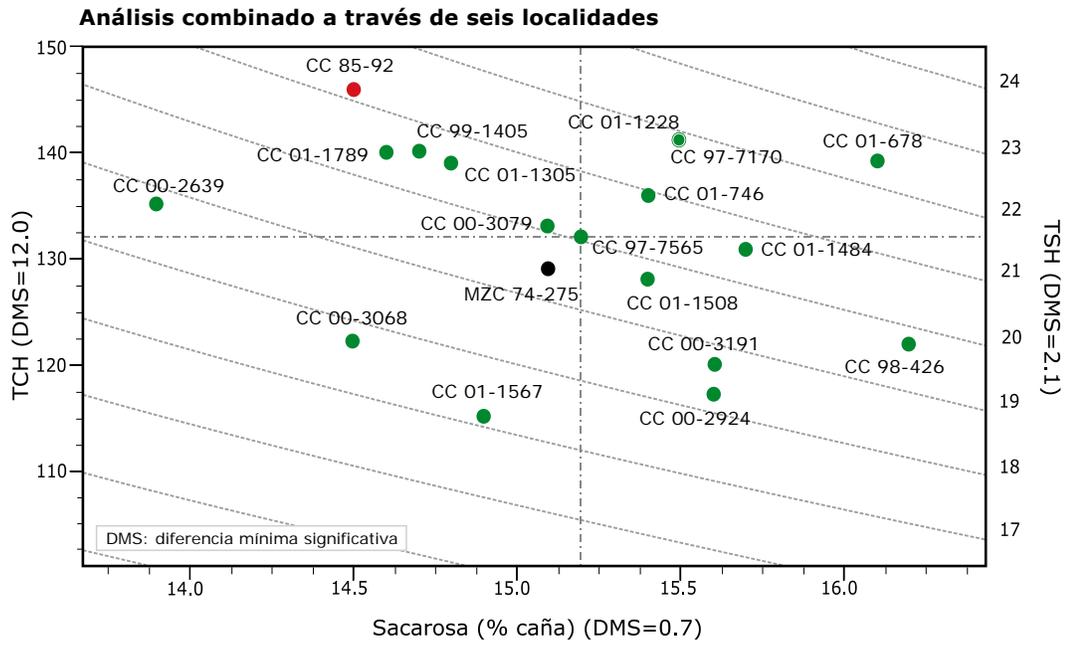


Figura 7. Curvas de isoproductividad de la prueba regional en zonas secas-semisecas con variedades de las series 97-01 (primera soca). Análisis combinado a través de seis ingenios.

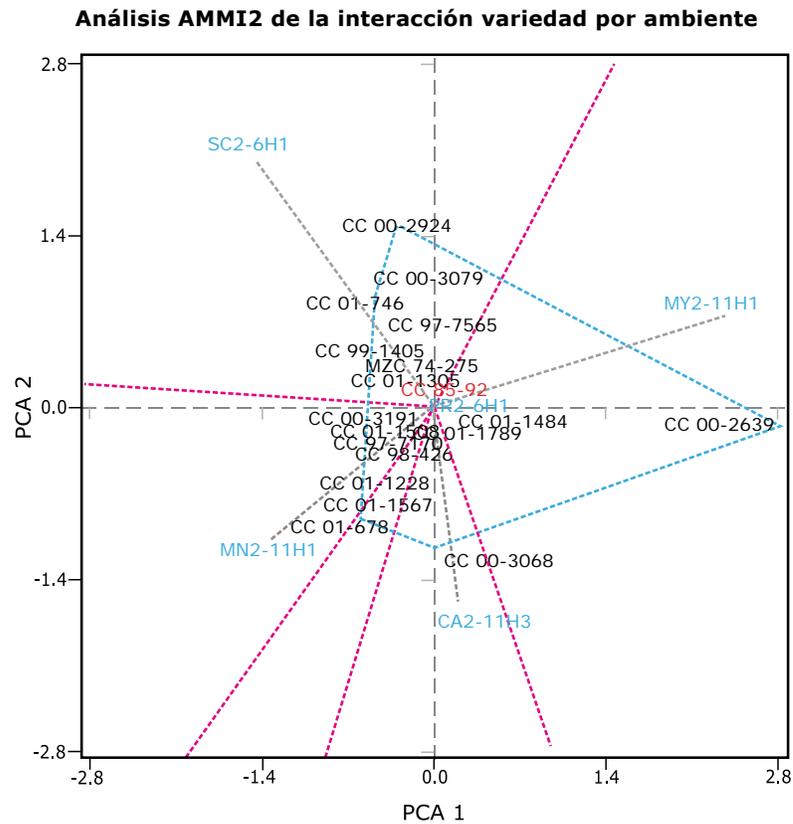


Figura 8. Análisis AMMI2 para las dos primeras componentes principales (PCA) de la interacción variedad por ambiente. Prueba regional para zonas secas-semisecas con variedades de las series 97-01 (primera soca). Análisis a través de cinco ingenios.

### Análisis AMMI a través de cinco ingenios

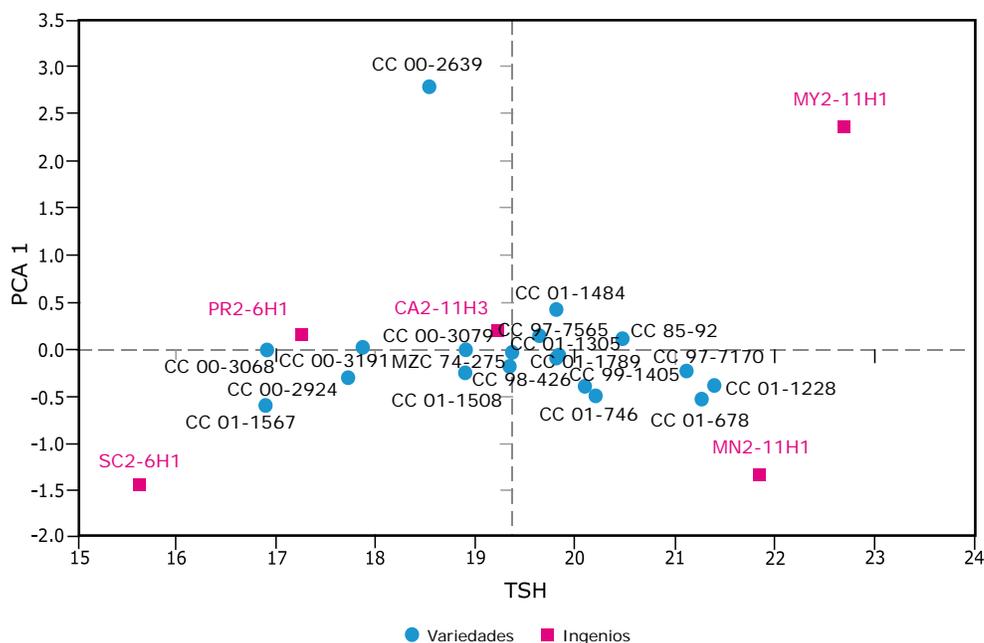


Figura 9. Análisis AMMI para los dos componentes aditivos (ingenios y variedades) y la primera componente principal (PCA) de la interacción. Prueba regional para zonas secas-semisecas con variedades de las series 97-01 (primera soca). Análisis a través de cinco ingenios.

### Seguimiento fitosanitario

Se hicieron evaluaciones de la incidencia de la enfermedad del carbón (*Ustilago scitaminea* Sydow) y de la intensidad de infestación del insecto barrenador del tallo *Diatraea* spp.

**Carbón (*Ustilago scitaminea* Sydow).** La evaluación se llevó a cabo en la suerte 87A de la hacienda La Esmeralda del Ingenio Sancarlos, donde en la primera soca se encontró alta incidencia de la enfermedad en las tres repeticiones de la variedad CC 01-1789, con valores que oscilaron entre 12.6% y 31%; esta variedad no había mostrado dicha enfermedad en evaluaciones anteriores, cuando sí había mostrado susceptibilidad a la roya café (*Puccinia melanocephala* H. Sydow y P. Sydow). Con valores de incidencia de carbón inferiores a 1.6% se registraron las variedades CC 01-678, CC 01-1484, CC 01-1508, CC 00-3079, CC 98-426, CC 97-7170, CC 99-1405 y CC 00-2639, y el resto de las variedades no presentaron la enfermedad (Cuadro 9).

***Diatraea* spp.** Las evaluaciones de incidencia del barrenador *Diatraea* se llevaron a cabo en cuatro ingenios. De acuerdo con los resultados, cinco variedades fueron calificadas como susceptibles a medianamente susceptibles, seis como intermedias y seis como moderadamente resistentes a resistentes. Se destacaron las variedades CC 00-2924 y CC 00-3191 por ser las más resistentes y CC 00-3068, CC 01-1228, CC 01-746 y CC 98-426 por ser moderadamente resistentes (Cuadro 10). La variedad CC 85-92 fue calificada como resistente y la MZC 74-275, como intermedia. Las evaluaciones se repetirán en la segunda soca de esta prueba regional.

Cuadro 9. Incidencia de carbón en variedades de las series 97-01, hacienda Esmeralda, suerte 87A, Ingenio Sancarlos. Primera soca, prueba regional para zonas secas-semisecas.

Variedad	Incidencia (%)		
	Media	Mínimo	Máximo
CC 98-426	0.0	0.0	0.1
CC 01-678	0.6	0.0	1.5
CC 01-1484	0.7	0.1	1.8
CC 01-1789	21.9	12.6	31.0
CC 01-1508	0.4	0.0	1.2
CC 00-3079	0.3	0.0	0.8
CC 97-7170	0.6	0.0	1.5
CC 99-1405	0.1	0.0	0.3
CC 00-3191	0.1	0.0	0.1
CC 00-2639	0.1	0.0	0.2

Cuadro 10. Índice de resistencia de las variedades de las series 97-01 al insecto barrenador del tallo *Diatraea* spp. en la primera soca del experimento de prueba regional para zonas secas-semisecas. Media de cuatro ingenios.

Variedad	Índice de resistencia al barrenador <i>Diatraea</i> spp. <sup>1</sup>				
	Ing. Manuelita	Ing. Providencia	Ing. Mayagüez	Incauca	Media
CC 00-2924	R	I	MR	R	R
CC 00-3191	R	R	R	R	R
CC 00-3068	MR	R	MS	I	MR
CC 01-1228	I	MS	MR	MR	MR
CC 01-746	MR	I	I	MR	MR
CC 98-426	MR	MR	MR	I	MR
CC 00-2639	MR	R	S	I	I
CC 01-1305	MS	R	I	R	I
CC 01-1484	I	S	I	I	I
CC 01-1508	MS	I	R	MR	I
CC 01-1567	I	I	I	S	I
CC 01-678	I	MR		MR	I
CC 97-7170	MS	I	MS	MS	MS
CC 97-7565	I	I	MS	S	MS
CC 00-3079	S	S	MS	S	S
CC 01-1789	S	I	I	S	S
CC 99-1405	S	S	MR	S	S
MZC 74-275	I	MS	S	I	I
CC 85-92	MR	MR	R	I	R

1. Índice de resistencia: R: Resistente; MR: Medianamente resistente; I: Intermedia; MS: Medianamente susceptible; S: Susceptible

## Conclusiones

- Los resultados de la primera soca muestran que las variedades más estables y que ofrecen un alto potencial genético son CC 01-1228, CC 97-7170, CC 01-678, CC 00-3079, CC 01-1789 y CC 01-1484.
- En el análisis por localidad, las variedades más estables a través de los dos cortes y que presentaron porcentajes de ganancia relativa con respecto al testigo CC 85-92 fueron: CC 01-678, CC 97-7170 y CC 01-128 (Ingenio Manuelita); CC 00-3079, CC 01-1228 y CC 97-7170 (Sancarlos); CC 01-1228 y CC 97-7170 (Providencia); CC 01-1228 y CC 01-678 (Incauca); CC 00-2639, CC 97-7170, CC 01-1484 y CC 01-1228 (Mayagüez); CC 01-1484, CC 98-426, CC 01-678 y CC 01-1508 (Riopaila).
- Los tonelajes de caña por hectárea de las variedades fueron menores en la primera soca con respecto a la plantilla debido a las condiciones de alta humedad que se presentaron en la mayoría de los sitios durante la cosecha de la plantilla y al período prolongado de sequía que ocurrió durante el desarrollo de la soca.
- El porcentaje más alto de resiembra (30%) se registró con la variedad CC 00-2639; no obstante, en la hacienda San Rafael del Ingenio Mayagüez, zona agroecológica 11H1, donde la plantilla se cosechó en condiciones secas y se hizo un buen manejo de los residuos, esta variedad produjo en la primera soca 182 TCH, el valor más alto en tonelaje de toda la prueba regional; lo anterior indica que el pisoteo y los altos residuos de cosecha pueden afectar negativamente su producción.

## Referencias bibliográficas

- Cruz, C. 2001. Programa Genes. Version Windows. Aplicativo computacional em genética e estadística. UFV. Brasil.
- Vargas, M.; Crossa, J.; van Eeuwijk, F.; Sayre, K.; Reynolds, M.P. 2001. Interpreting treatment x environment interaction in agronomy trials. *Agronomy J.* 93:949-960
- Salazar, F.A. y Victoria, J.I. 2010. Validación de modelos estadísticos multivariados en el proceso de selección de variedades de caña de azúcar. Caso: variedad CC 85-92. *Carta Trimestral.* v.32, 1 y 2 (enero-junio): 40-46
- Viveros, C.A.; López, L.O.; Salazar, F.A.; Ángel, J.C.; Gómez, L.A.; Victoria, J.I. 2009. Prueba regional de variedades en zonas semisecas: Resultados de las Series 97 a 01 en plantilla. *Carta Trimestral.* v.31, 1 y 2 (enero-junio): 8-19

# Validación de modelos estadísticos multivariados en el proceso de selección de variedades de caña de azúcar. Caso: variedad CC 85-92

Fredy Salazar y Jorge I. Victoria K.\*



Variedad CC 85-92

## Introducción

En los procesos de mejoramiento genético es necesario evaluar nuevas técnicas estadísticas de análisis, adaptarlas e implementarlas para hacer más eficiente la selección de variedades y la predicción del comportamiento de los genotipos en determinados ambientes. En este sentido se han desarrollado diferentes técnicas multivariadas que han sido utilizadas ampliamente en cultivos como maíz, arroz, soya y trigo.

Los modelos multivariados fueron desarrollados a principios de 1900 pero sólo en las últimas décadas han sido aplicados en el campo del mejoramiento genético. Muchos de ellos contribuyen a explicar en detalle algunos fenómenos biológicos como la interacción genotipo por ambiente, lo cual les permite a los fitomejoradores hacer más eficiente la selección de los genotipos, maximizar el potencial genético y predecir el comportamiento y la adaptación en ambientes específicos. Entre los modelos estadísticos multivariados de mayor uso están el modelo de efectos principales aditivos e interacciones multiplicativas (*Additive Main Effects and Multiplicative Interaction: AMMI*) y el modelo de regresión de sitios (SREG).

El modelo SREG se utiliza para el análisis de los datos provenientes de ensayos multiambientales comparativos de rendimiento, en especial cuando el ambiente (E) es la fuente de variación más importante en relación con la contribución del genotipo (G) y la interacción genotipo-ambiente (GE). Este modelo, que incluye el término bilineal  $G+GE$ , proporciona un análisis gráfico del comportamiento (rendimiento y estabilidad) de los genotipos denominado biplot GGE. Este gráfico permite identificar el genotipo de mayor potencial en cada ambiente y agrupar genotipos y ambientes con patrones similares de respuesta (Ibáñez *et al.*, 2006). Los modelos AMMI, al permitir una representación biplot de filas (genotipos) y columnas (ambientes), dan la posibilidad de estudiar el grado de estabilidad de los genotipos al ser probados en diferentes ambientes (Varela y Castillo, 2005). Los modelos AMMI suelen denominarse como AMMI1, AMMI2... AMMI $n$ , según el número de componentes principales usadas para modelar la interacción (Balzarini *et al.*, 2005).

El presente trabajo tiene como objetivo validar en caña de azúcar el uso de los dos modelos multivariados mencionados, su capacidad predictiva y la eficiencia para el manejo y uso de la interacción genotipo por ambiente con el enfoque de la agricultura específica por sitio. Los resultados de la validación indican que con el uso de estos modelos de análisis en las pruebas regionales de variedades Cenicaña Colombia (CC) se facilitarán los procesos de selección de genotipos con potencial de multiplicación para la producción a escala comercial.

\* Ingeniero Agrónomo, Ph.D., Fitomejorador <fsalazar@cenicana.org>; Ingeniero Agrónomo, Ph.D., Director Programa de Variedades <jivictoria@cenicana.org>. Ambos de Cenicaña

## Materiales y métodos

Se usaron los datos de la prueba regional de la serie 1985 (tres cortes, entre marzo de 1990 y diciembre de 1994) que incluyó las variedades de caña de azúcar CC 85-27, CC 85-47, CC 85-53, CC 85-63, CC 85-71, CC 85-92 y CC 85-96 y como testigos la MZC 74-275 y la V 71-51. La prueba fue sembrada en un diseño de bloques completos al azar y cuatro repeticiones, donde el área de la parcela útil varió entre 72–105 m<sup>2</sup>. En el Cuadro 1 se muestran los ingenios azucareros y las zonas agroecológicas de la prueba regional.

Para la validación de los modelos se tuvo en cuenta la información de lotes comerciales del período 1995-2009 reportada por doce ingenios azucareros donde se sembraron las variedades CC 85-92, CC 84-75, CC 85-96, MZC 74-275, PR 61-632 y V 71-51; se analizaron las variables rendimiento (porcentaje de azúcar recuperado por tonelada de caña molida, en peso), toneladas de caña por hectárea (TCH) y toneladas de azúcar por hectárea (TAH), para un total de 289,542 registros.

En el análisis de estabilidad y adaptabilidad de las variedades se usaron el modelo de efectos principales aditivos e interacciones multiplicativas (*Additive Main Effects and Multiplicative Interaction*, AMMI) (Gauch, 2006; Crossa *et al.*, 2004) y el modelo de regresión de sitios (SREG) (Yan *et al.*, 2000; Yan *et al.*, 2001; Yan and Kang, 2003). La información de la prueba regional y los datos comerciales fueron analizados por localidad y mediante análisis combinado a través de ambientes. Se usaron el modelo lineal mixto (Yan, 2007) y el paquete estadístico SAS para Windows® versión 9.2 (SAS, 2008).

## Resultados y discusión

### Análisis de la prueba regional de la serie 85

El análisis combinado de varianza de 45 sitios (15 haciendas por tres cortes) mostró coeficientes de variación bajos para las variables sacarosa % caña (6%), TCH (12%) y toneladas de sacarosa por hectárea TSH (13%) y heredabilidades superiores al 96%, lo cual indicó un adecuado control del error experimental. En los tres caracteres estudiados se encontraron diferencias estadísticas altamente significativas para las fuentes de variación localidad (L), variedad (V) y la interacción localidad por variedad (L\*V). En la expresión de las tres variables el efecto más importante fue el de la localidad, seguido por la variedad y la interacción localidad por variedad. Los resultados son explicados por las diferencias genéticas entre las variedades y la respuesta diferente de éstas en los distintos ambientes (agronomía, suelos, agua, fertilización, etcétera). La expresión fenotípica de las variedades dependió directamente de los ambientes. Se encontraron diferencias estadísticas significativas de las variedades entre haciendas y cortes y en las interacciones de haciendas por variedad y corte por variedad, lo cual hace difícil la selección de genotipos de adaptación amplia y lleva a la selección de genotipos de adaptación específica según haciendas y zonas agroecológicas.

En la Figura 1 se presenta el biplot o gráfica de doble entrada de las dos primeras componentes principales (CP1 y CP2) de la interacción localidad por variedad (biplot AMMI2) para el carácter TSH. Las variedades y sitios próximos al centro (0,0) se consideran estables (su TSH

Cuadro 1. Ingenios, haciendas y zonas agroecológicas en donde fue sembrada la prueba regional con variedades Cenicaña Colombia (CC) de la serie 1985 (tres cortes, 1990-1994).

Ingenio	Hacienda	Zona agroecológica <sup>1</sup>
Castilla	Vallecitos	29H1, 30H1, 7H1
	Calanda	10H2, 11H2
Incauca	San Fernando	11H3
	El Naranjo	10H4
La Cabaña	Taula Mejía	6H3
	Orocue	11H3
Manuelita	Florencia	6H1
Mayagüez	La Dominga	11H1
Pichichí	Pichichí	6H1, 6H0, 26H0
Providencia	Providencia	6H1, 11H1
	La Esmeralda	15H1
Riopaila	Normandía	5H3
	Media Luna	14H1
Risaralda	Constancia	10H5
Sancarlos	Ballesteros	6H1

1. Cuarta aproximación de la zonificación agroecológica para el cultivo de la caña de azúcar en el valle del río Cauca (Cenicaña, 2008)

no cambia entre localidades, zonas agroecológicas, años y/o manejo agronómico); en la medida que se alejan de cero, las variedades tienden a ser sensibles a cambios del ambiente, de modo que las localidades permiten observar diferencias entre variedades. Las localidades y las variedades ubicadas en el mismo cuadrante son complementarias, con interacciones positivas, lo cual significa que tales variedades presentan buena adaptación en esas localidades. La ubicación en cuadrantes opuestos expresa interacciones negativas, de forma que las variedades indicadas no se recomiendan para dichas localidades por falta de adaptación. De acuerdo con el análisis representado en el biplot AMMI2, las variedades sensibles a los cambios ambientales fueron MZC 74-275, CC 85-71, CC 85-47 y CC 85-53 y las más estables fueron CC 85-92 y CC 85-96.

La Figura 2 muestra el biplot de la primera componente principal (CP1) de la interacción y los componentes aditivos del modelo (variedades y localidades) para la variable TSH; el gráfico se identifica como biplot AMMI1 por recoger sólo una componente de la interacción. Las variedades estables y agronómicamente deseables presentaron un valor de CP1 bajo o muy cercano a cero y además un valor de TSH por encima de la media general. La variedad MZC 74-275 fue inestable y con tonelaje de sacarosa por hectárea bajo, seguida de la CC 85-47. Las variedades CC 85-96 y CC 85-92 fueron las más estables, y la última fue la de mejor TSH *per se*. Las variedades V 71-51, CC 85-63, CC 85-71 y CC 85-27 fueron estables pero su TSH *per se* fue inferior a la media general.

En la Figura 3 se muestran las gráficas de las componentes principales (CP1 y CP2) del modelo regresión de sitios por variedad (biplot GGE): la Figura 3A para 45 sitios (15 haciendas en cada uno de los tres cortes) y la Figura 3B para 15 haciendas (media de tres cortes). El análisis estableció una regresión positiva entre las variedades y los ambientes de evaluación. El análisis combinado de 45 sitios mostró que las variedades CC 85-96 y CC 85-92 correlacionaron positivamente con la mayoría de los ambientes, excepto en el segundo corte con Normandía (Riopaila, zona 5H3), La Esmeralda (Providencia, 15H1) y San Fernando (Incauca, 11H3) (Figura 3A). Las haciendas correlacionaron positivamente con las variedades CC 85-96 y CC 85-92; Normandía y La Esmeralda correlacionaron con la variedad CC 85-47 y en San Fernando las mejores variedades fueron MZC 74-275 y CC 85-63 (Figura 3B). Las variedades CC 85-71, CC 85-27 y CC 85-83 fueron inestables y no tuvieron sitios específicos de adaptación.

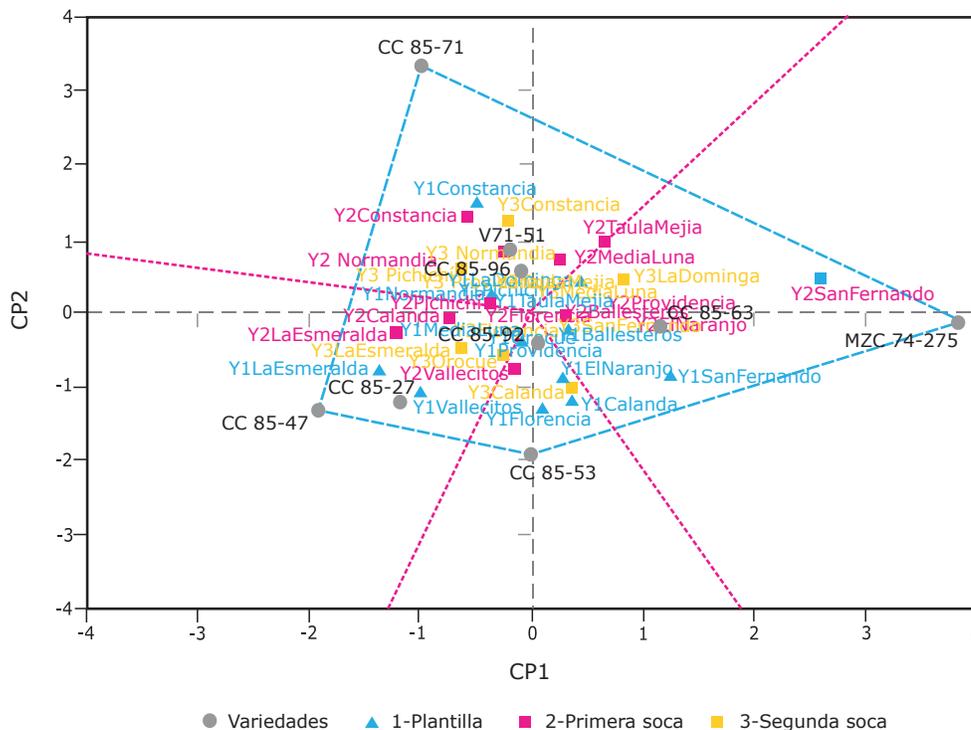


Figura 1. Biplot AMMI2 de la interacción localidad por variedad para la variable TSH (toneladas de sacarosa por hectárea) evaluada en siete variedades CC y dos testigos a través de 15 haciendas y tres cortes. Prueba regional de la serie 85. Las variedades estables son las más cercanas al centro; en los sitios más distantes del centro es donde las variedades dejan ver más diferencias fenotípicas.

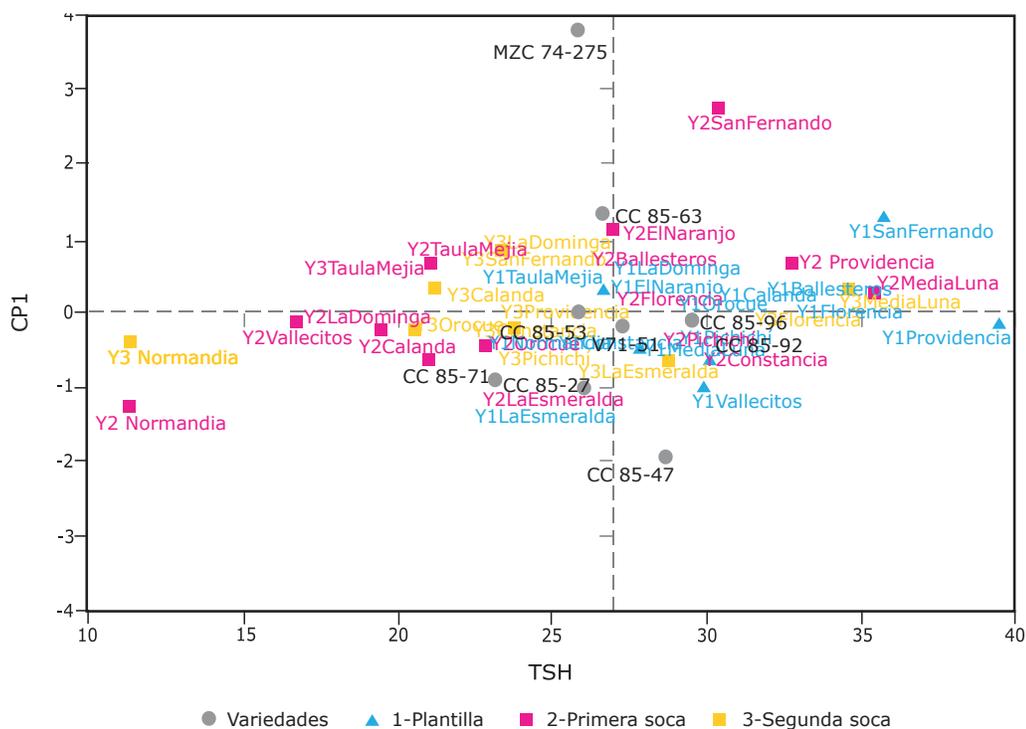


Figura 2. Biplot AMMI1 de la interacción localidad por variedad y la componente aditiva de TSH (toneladas de sacarosa por hectárea) evaluadas en siete variedades CC y dos testigos a través de 15 haciendas y tres cortes. Prueba regional de la serie 85. Las variedades más estables son las más cercanas a cero, con valores de TSH superiores a la media general.

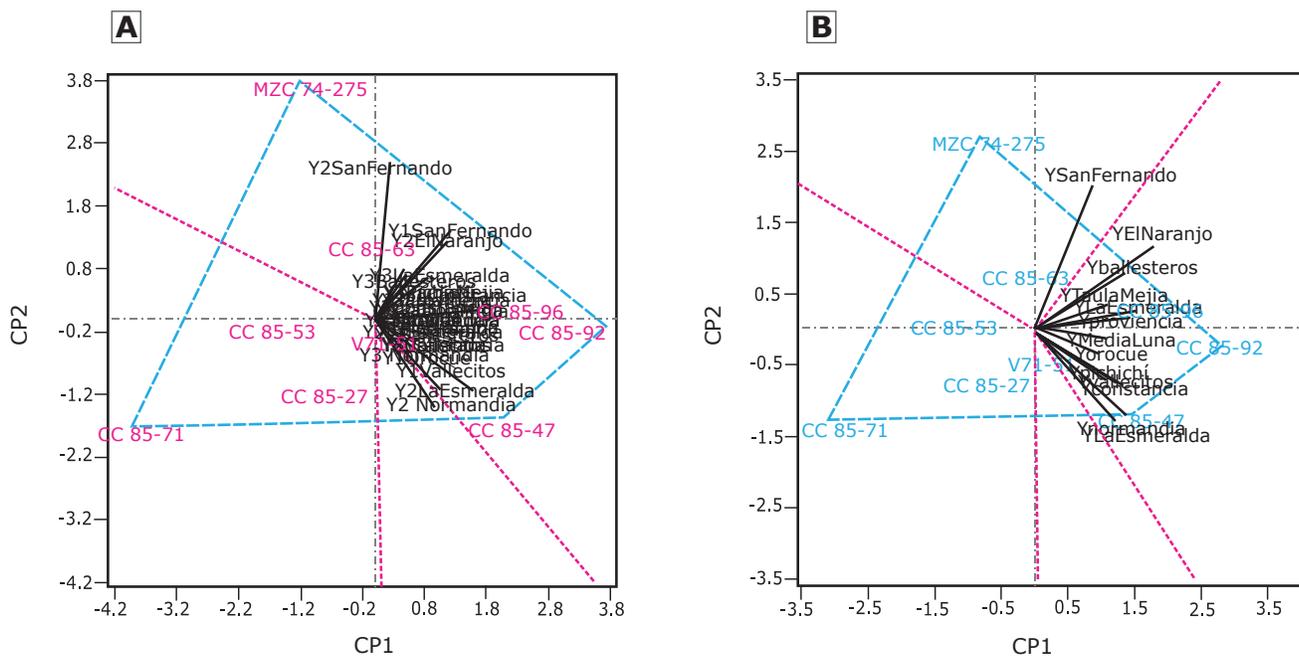


Figura 3. Biplot GGE de las dos primeras componentes principales (CP1 y CP2) de la interacción de localidad por variedad para la variable TSH (toneladas de sacarosa por hectárea) evaluada en siete variedades CC y dos testigos. Prueba regional de la serie 85: (A) 45 sitios (15 haciendas y cada uno de los tres cortes); (B) 15 haciendas (media de los tres cortes).

## Análisis de datos comerciales para el carácter rendimiento (1995-2009)

Los datos correspondientes a 33 zonas agroecológicas, 12 ingenios y 15 años para el carácter rendimiento (%) fueron analizados para estimar la interacción localidad por variedad. El coeficiente de variación fue bajo (8%) y la heredabilidad fue del 80%, lo cual señala un adecuado manejo del modelo estadístico en la disminución del error experimental. Se encontraron diferencias estadísticas altamente significativas entre zonas agroecológicas, años, ingenios, variedades y en las interacciones respectivas, lo cual indica la importancia que juega el ambiente en la expresión de las variedades.

En la Figura 4 se muestran los biplots AMMI2 y GGE de la interacción localidad por variedad para la variable rendimiento (%) evaluada en seis variedades a través de 15 años. Según el biplot AMMI2 (Figura 4A), la variedad CC 85-92 es la más estable, seguida de V 71-51; las condiciones ambientales predominantes en 1996, 1998 y 2007 contribuyeron en la discriminación de genotipos con respecto al carácter rendimiento (%). El biplot GGE (Figura 4B) mostró una fuerte correlación entre la variedad CC 85-92 y los años de evaluación, excepto en 2007 y 2008 cuando la variedad CC 85-96 fue la mejor.

En el análisis por ingenio (Figura 5), las variedades CC 85-92 y CC 84-75 mostraron rendimientos estables en todos ellos, y MZC 74-275, PR 61-932 y CC 85-96 fueron sensibles a los cambios ambientales. En los ingenios Castilla, Mayagüez, Providencia y Risaralda se encontraron más diferencias entre las variedades (Figura 5A), y la variedad CC 85-92 presentó correlación directa y positiva con la mayoría de los sitios de evaluación y la CC 85-96 mostró buena adaptación en Incauca, Manuelita y Providencia (Figura 5B).

Finalmente, en la Figura 6 se presenta la estabilidad de la variedad CC 85-92 en comparación con CC 84-75, CC 85-96, MZC 74-275 y V 71-51 en función del coeficiente de regresión de cada una a través de 15 años (1995-2009) y de las desviaciones de la regresión medidas a través de la falta de ajuste del modelo o coeficiente de determinación ( $R^2$ ). La variedad con rendimiento estable a través de los sitios y años de evaluación es aquella que muestra un coeficiente de determinación igual o cercano a uno (100%); la respuesta al cambio ambiental fue evaluada con el coeficiente de regresión, de modo que la respuesta es positiva cuando dicho valor es superior a uno. Así, la variedad MZC 74-275 presentó un rendimiento superior al de la CC 85-92 pero su estabilidad a través de sitios, zonas agroecológicas y años de evaluación es errático, lo cual se refleja en el bajo coeficiente de determinación (48%); el coeficiente de determinación de CC 85-92 fue de 96% (Figura 6A). La estabilidad del rendimiento de la variedad CC 84-75 (coeficiente de determinación de 82%) fue inferior a la de CC 85-92 (Figura 6B). Por su parte, la variedad CC 85-96 tuvo un rendimiento muy similar al de CC 85-92 pero su comportamiento fue bastante inestable en el tiempo, lo que se refleja en su bajo coeficiente de determinación (26%) (Figura 6C). La variedad V 71-51 mostró un rendimiento inestable ( $R^2=70\%$ ) e inferior al de CC 85-92 (Figura 6D).

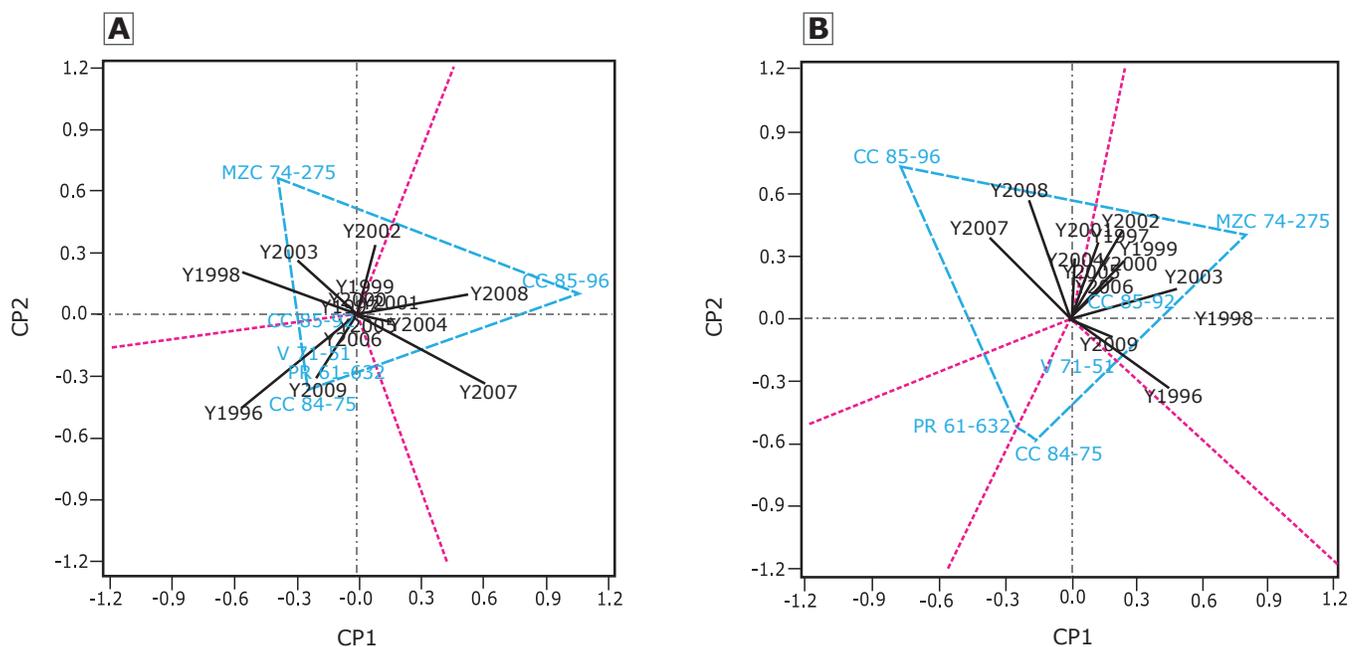


Figura 4. (A) Biplot AMMI2 y (B) Biplot GGE de la interacción localidad por variedad para la variable rendimiento (%) evaluada en seis variedades a través de 15 años (1995-2009). Datos comerciales reportados por doce ingenios azucareros.

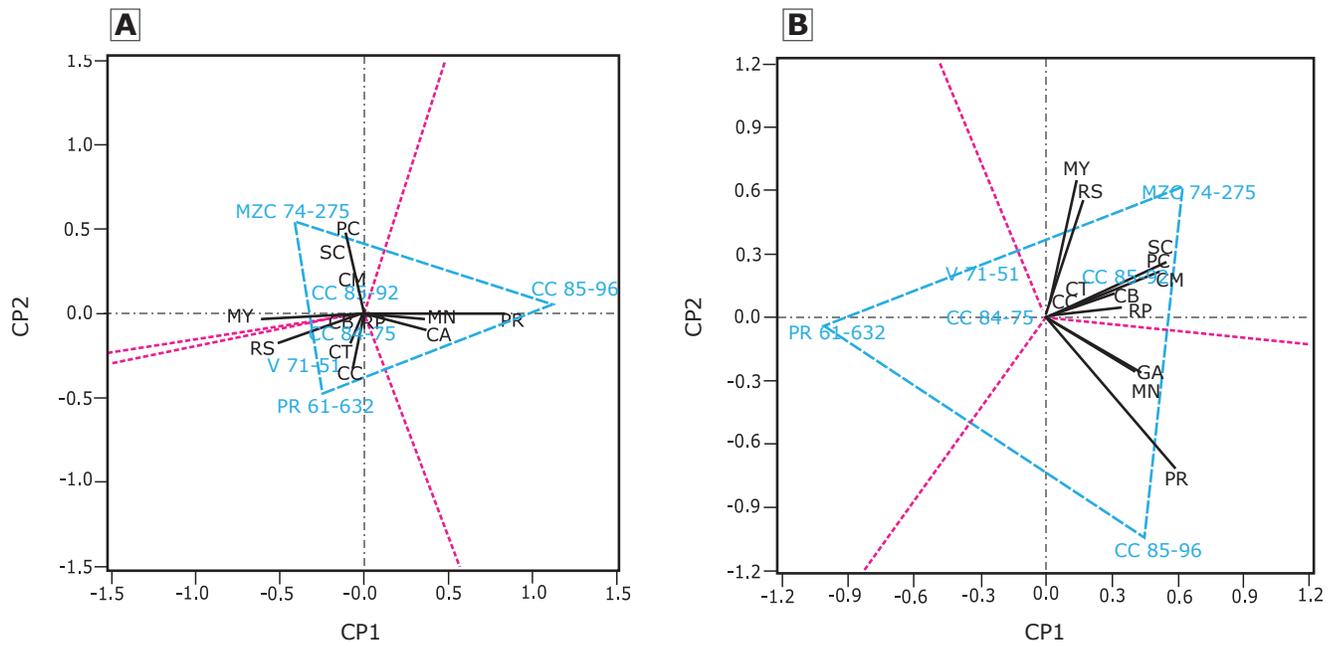


Figura 5. (A) Biplot AMMI2 y (B) Biplot GGE de la interacción localidad por variedad para la variable rendimiento (%) evaluada en seis variedades y en doce ingenios azucareros a través de 15 años (1995-2009). Datos comerciales.

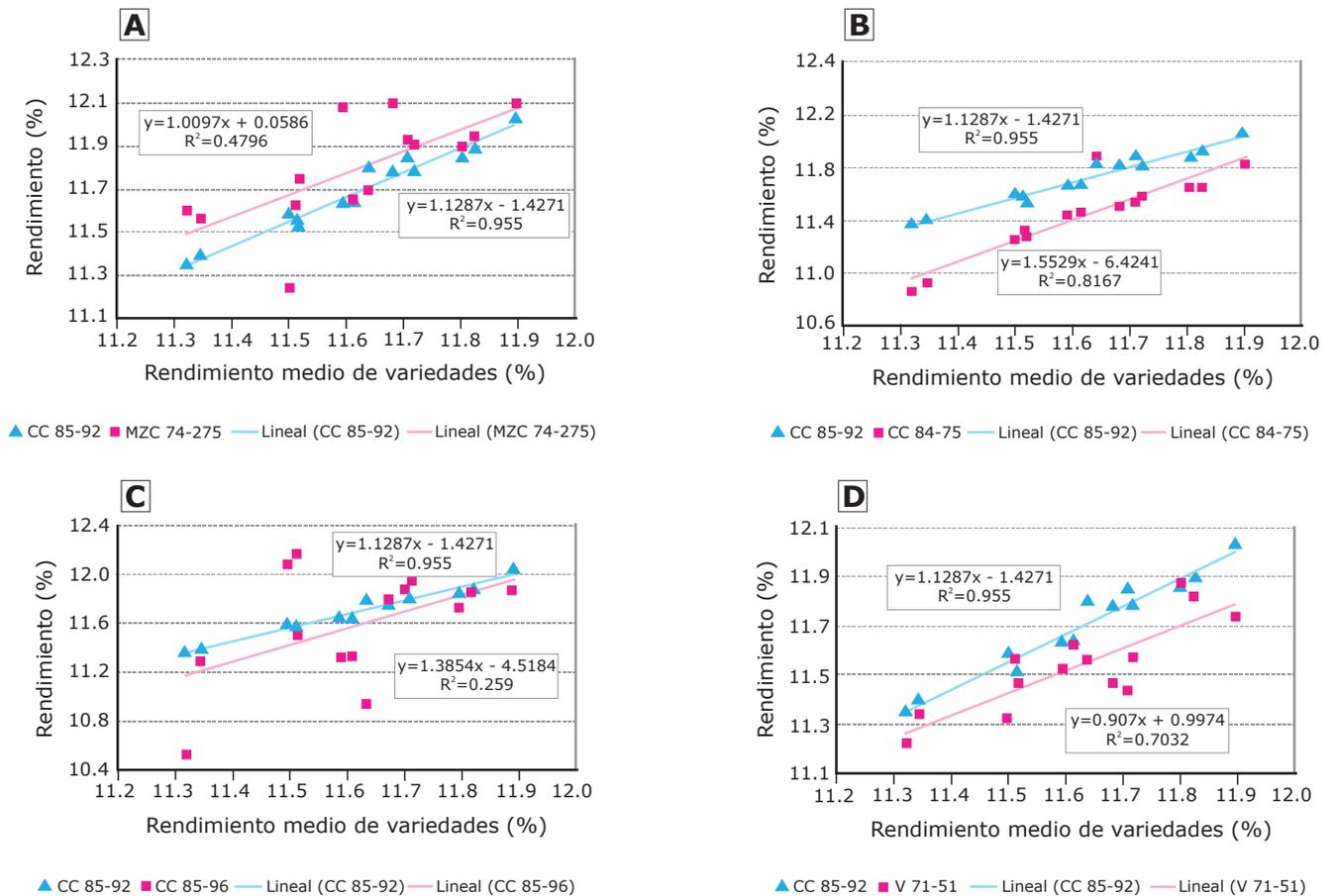


Figura 6. Estabilidad de CC 85-92 versus MZC 74-275, CC 84-75, CC 85-96 y V 71-51 en función del coeficiente de regresión y de los desvíos de la regresión estimados en la falta de ajuste del modelo ( $R^2$ ), evaluadas a través de 15 años (1995-2009). Datos comerciales de doce ingenios.

## Conclusiones

Los análisis de la prueba regional mostraron que la variedad CC 85-92 fue la más estable a través de los ambientes de evaluación, lo que la perfiló como una variedad promisoría. Los resultados fueron validados con el análisis de la información comercial que muestran que la variedad CC 85-92 es realmente una de las variedades más estables a través de ambientes.

Con estos resultados se concluye que los modelos multivariados AMMI y SRGE pueden ser utilizados en ensayos multiambientales de las pruebas regionales de caña de azúcar, dado que son apropiados para estudiar la interacción genotipos por ambiente y para predecir el comportamiento de las variedades a través de sitios. Los modelos multivariados son un complemento estadístico que suma eficiencia en la selección de variedades de adaptación específica, enfoque adoptado por Cenicaña para contribuir al desarrollo de la agricultura específica por sitio en el cultivo de la caña de azúcar en el valle del río Cauca.

## Referencias bibliográficas

- Balzarini, M.; Bruno, C.; Arroyo, A. 2005. Análisis de Ensayos Agrícolas Multiambientales. Info-Gen, Córdoba, Argentina. 141 pp.
- Cenicaña (Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia). 2008. Informe Anual 2007. Cenicaña, Colombia. 108 p.
- Crossa, J.; Yang, R.-C.; Cornelius, P.L. 2004. Studying crossover genotype  $\times$  environment interaction using linear–bilinear models and mixed models. *J. Agric. Biol. Environ. Stat.* 9:362–380.
- Gauch, H.G. 2006. Statistical analysis of yield trials by AMMI and GGE. *Crop Sci.* 46:1488–1500
- Ibañez, M.A.; Cavanagh, M.M.; Bonamico, N.C.; Di Renzo, M.A. 2006. Análisis gráfico mediante biplot del comportamiento de híbridos de maíz. *Revista de Investigaciones Agropecuarias.* 35, 3 (diciembre): 83-93. Disponible en <[www.inta.gov.ar/ediciones/ria/35\\_3/art6.htm](http://www.inta.gov.ar/ediciones/ria/35_3/art6.htm)> consultado el 30/3/2010.
- Varela, M. y Castillo, J.G. 2005. Modelos con término multiplicativo. Aplicación en el análisis de la interacción genotipo ambiente. *Cultivos Tropicales.* 26, 3: 71-75. Disponible en <[www.inca.edu.cu/otras\\_web/revista/pdf/2005/3/CT26310.pdf](http://www.inca.edu.cu/otras_web/revista/pdf/2005/3/CT26310.pdf)> consultado el 30/3/2010.
- Yan, R. 2007. Mixed-Model Analysis of Crossover Genotype-Environment Interactions. *Crop. Sc.* 47:1051-1062.
- Yan, W.; Hunt, L.A.; Sheng, Q.; Szlavics, Z. 2000. Cultivar evaluation and mega-environment investigation based on the GGE biplot. *Crop Sci.* 40:597–605.
- Yan, W.; Cornelius, P.L.; Crossa, J.; Hunt, L.A. 2001. Two types of GGE biplots for analyzing multi-environment trial data. *Crop Sci.* 41:656–663.
- Yan, W. and Kang, M.S. 2003. GGE biplot analysis: A graphical tool for breeders, geneticists, and agronomists. CRC Press, Boca Raton, FL.

# Maduración y crecimiento de la caña de azúcar

Fernando Villegas T.\*

## Introducción

La caña de azúcar tiene una de las tasas de crecimiento más altas entre los cultivos comerciales debido a su alta eficiencia fotosintética. Desde el momento en que la planta germina y emite sus primeras hojas comienza a producir azúcares simples como la glucosa y la fructuosa, productos de la fotosíntesis que mediante un proceso de síntesis forman la sacarosa que se almacena en las hojas y los tallos; a través de un proceso de hidrólisis o inversión la sacarosa se desdobra nuevamente en glucosa y fructosa para proveer la energía que la planta requiere para su crecimiento.

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

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

Después de los diez meses de edad la caña disminuye de forma natural su ritmo de crecimiento y en condiciones normales los tallos pueden crecer alrededor de 6 cm cada semana. En ese momento los tallos empiezan a almacenar un excedente de sacarosa y es cuando se inicia el proceso de maduración de la caña de azúcar (Villegas y Torres, 1993).

La maduración de la caña de azúcar en el valle del río Cauca ocurre en condiciones de alta disponibilidad de nutrimentos y humedad en el suelo, altas temperaturas durante el día y, en ocasiones, temperaturas no muy bajas durante la noche, lo cual estimula el crecimiento de los tallos y por lo tanto un consumo de energía que debe ser suministrada por la reserva de sacarosa; como consecuencia los rendimientos comerciales disminuyen si la caña se cosecha en estas condiciones.



***Durante los primeros cuatro meses de edad la caña utiliza la mayoría de las reservas de sacarosa en la emisión de tallos y en los seis meses siguientes, en el crecimiento de los mismos. Luego de los diez meses de edad el ritmo de crecimiento disminuye de forma natural y los tallos comienzan a almacenar un excedente de sacarosa, de modo que la planta inicia el proceso de maduración.***

***Según la variedad de caña, el suelo, el clima y las prácticas de cultivo, en el valle del río Cauca los tallos pueden crecer por semana alrededor de 1.5-2.0 cm en los primeros cuatro meses, entre 8-10 cm del cuarto al décimo mes y cerca de 6 cm después de los diez meses.***

\* Ingeniero Agrícola, M.Sc., Ingeniero de Mecanización Agrícola <fvillegas@cenicana.org>. Cenicaña.

## Crecimiento y contenido de sacarosa de los tallos

Las diferencias en el contenido de sacarosa entre las variedades de caña durante el período de maduración se deben, en buena medida, a las diferencias en la capacidad de crecimiento que presentan las variedades durante este período, como se puede observar en una evaluación del contenido de sacarosa y el crecimiento de las variedades MZC 74-275, CC 85-68 y CC 85-92 realizada entre los 10 y los 16 meses de edad (Figura 1).

Las variedades crecieron en el mismo lote, en igualdad de condiciones en cuanto al tipo de suelo, el clima y el manejo; sin embargo, presentaron contenidos diferentes de sacarosa durante el período de maduración: la variedad CC 85-68 presentó los contenidos más altos durante todo el período de evaluación, superiores a los de la variedad MZC 74-275 que presentó valores intermedios, y a los de la variedad CC 85-92 que presentó los valores más bajos de sacarosa. Al medir el crecimiento de los tallos en estas tres variedades durante el período de maduración se pudo ver claramente una relación inversa entre el contenido de sacarosa y el crecimiento de los tallos; la variedad CC 85-68, que tuvo los mayores contenidos de sacarosa, fue la de menor crecimiento durante el período de maduración y la variedad CC 85-92, que presentó los contenidos de sacarosa más bajos, fue la de mayor crecimiento durante el período de evaluación.

Estos resultados demuestran que la maduración y el crecimiento son procesos antagónicos dado que mientras haya crecimiento acelerado de los tallos y en general de todas las partes de la planta, buena parte de la sacarosa producida se utiliza como fuente energética en los puntos de crecimiento.

*Se ha demostrado que la maduración y el crecimiento son procesos antagónicos debido a que mientras haya crecimiento acelerado de los tallos y en general de todas las partes de la planta, buena parte de la sacarosa producida se utiliza como fuente energética en los puntos de crecimiento.*

*El uso de maduradores que actúan como reguladores del crecimiento evita que las reservas de sacarosa sean utilizadas por la planta en altas cantidades en los puntos de crecimiento durante el período final del ciclo del cultivo y permite obtener una mayor cantidad de sacarosa en los tallos cosechados.*

**Las diferencias en el contenido de sacarosa entre las variedades de caña durante el período de maduración se deben, en buena medida, a las diferencias en la capacidad de crecimiento que presentan las variedades durante dicho período, como se puede observar en esta evaluación del contenido de sacarosa y el crecimiento de las variedades MZC 74-275, CC 85-68 y CC 85-92 realizada entre los 10 y los 16 meses de edad.**

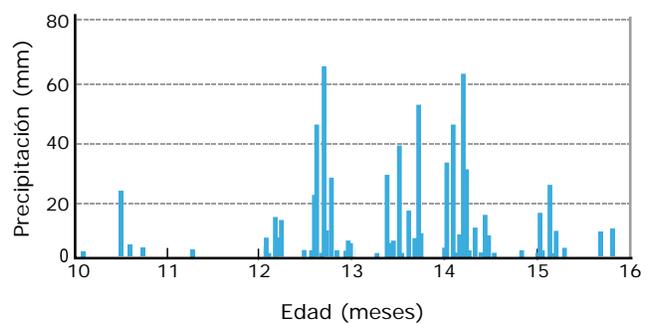
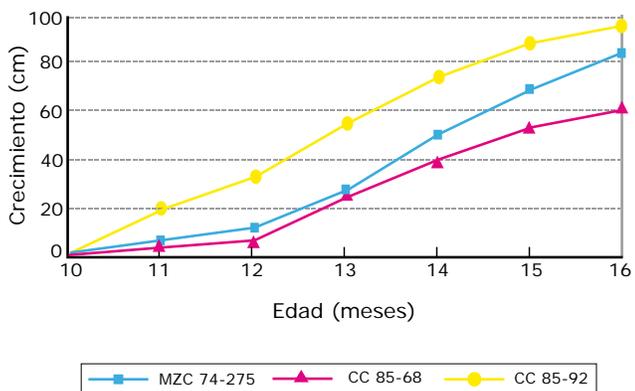
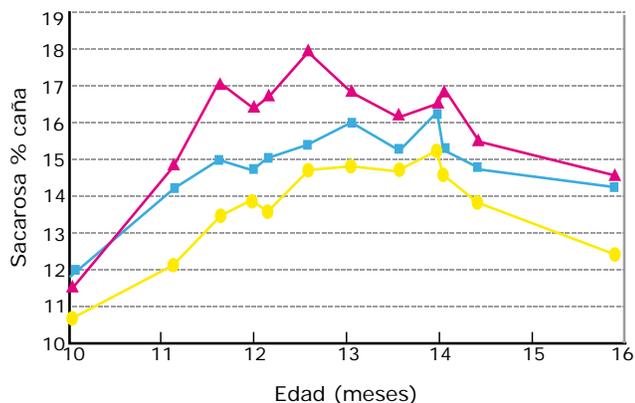


Figura 1. Contenido de sacarosa y crecimiento de tallos de tres variedades de caña de azúcar (plantilla) durante el período de maduración. Estación Experimental San Antonio de Cenicaña, lote 18.

## Regulación del crecimiento

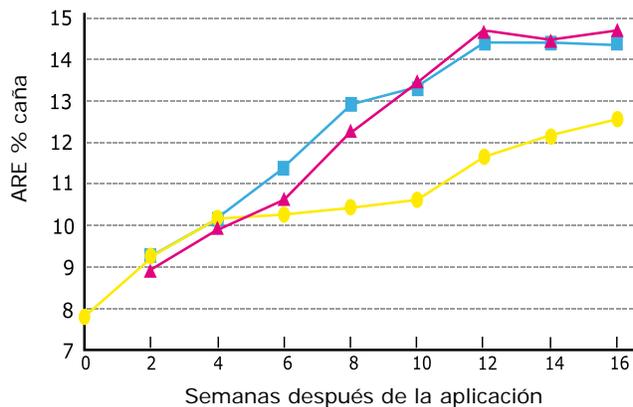
En el valle del río Cauca normalmente se tienen condiciones de fertilidad del suelo, temperatura del aire y disponibilidad de humedad que favorecen el crecimiento de los tallos durante el período de maduración de la caña, a diferencia de lo que ocurre en zonas de latitudes medias donde las bajas temperaturas y la ausencia de lluvias durante el período de zafra restringen el crecimiento de los tallos y favorecen la acumulación de sacarosa.

Esta situación ha conducido al empleo de una práctica agronómica para regular el crecimiento de los tallos al final del período de cultivo, en la cual se utilizan algunos productos químicos que aplicados en dosificaciones bajas del ingrediente activo actúan como reguladores de crecimiento y como consecuencia de este efecto primario permiten una mayor acumulación de sacarosa al momento de la cosecha. Estos productos se conocen comúnmente como maduradores o madurantes de la caña de azúcar.

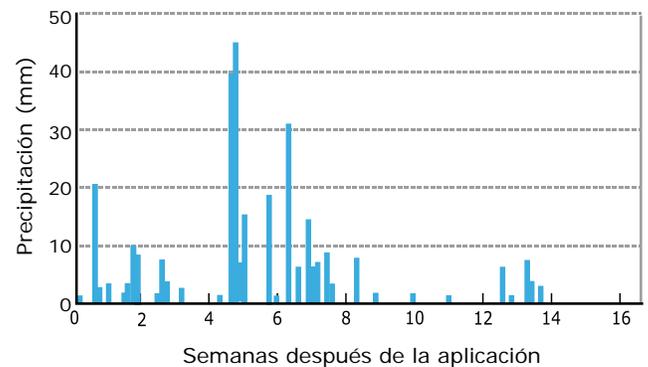
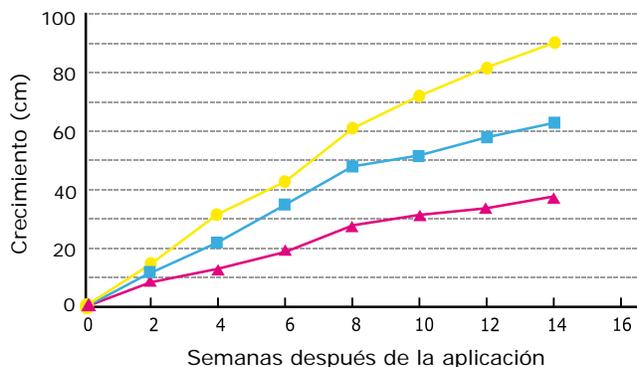
La efectividad de un madurador radica en su efecto regulador del crecimiento de la planta, en tanto ésta disminuye el consumo de sacarosa que utiliza como fuente energética en los puntos de crecimiento. De acuerdo con lo expuesto antes en relación con el efecto antagónico entre maduración y crecimiento, se podría pensar que cuanto más drástico sea el efecto del madurador en el crecimiento de los tallos, mayor puede ser el incremento obtenido en el contenido de sacarosa; pero este es un concepto equivocado, ya que los maduradores (o las dosificaciones) que afectan fuertemente el

crecimiento de los tallos también afectan el proceso de fotosíntesis de la planta, con lo cual se evita la producción normal de azúcares y su almacenamiento, de modo que lo que finalmente se obtiene en estos casos son tallos de poca longitud y sin mucha sacarosa. Con la selección adecuada del madurador y la dosificación se disminuye sólo un poco el ritmo de crecimiento de los tallos, sin detenerlo completamente pero sí lo suficiente para obtener incrementos en el contenido de sacarosa al momento de la cosecha que pueden llegar a ser de 1.5 y en ocasiones hasta de 3 unidades porcentuales.

En la Figura 2 se presentan los resultados de la evaluación de dos dosis de Glifosato (1 L/ha y 1.5 L/ha de producto comercial)



**La respuesta de variedad CC 85-92 con la dosis de 1.5 L/ha fue muy similar a la obtenida con la dosis de 1.0 L/ha, lo cual demuestra que, de acuerdo con la variedad y las condiciones de humedad en el suelo y el clima que se tuvieron durante la evaluación, la dosis de 1.0 L/ha fue suficiente para producir un buen incremento en la sacarosa con un efecto moderado en el crecimiento de los tallos.**



—■— Glifosato 1.0 L/ha —▲— Glifosato 1.5 L/ha —●— Testigo sin aplicación

Figura 2. Efecto de dos dosis de glifosato en el azúcar recuperable estimado (ARE % caña) y el crecimiento de los tallos de la variedad CC 85-92 (plantilla) en una época de escasa precipitación que coincidió con el período final de maduración. Aplicación a los 10 meses de edad de la caña. Estación Experimental San Antonio de Cenicaña, lote 13A.

en comparación con un testigo sin aplicación de madurador, en una plantilla de la variedad CC 85-92 cuyo período de maduración coincidió con una época de escasa precipitación.

En la Figura 2 se observa una excelente respuesta de los dos tratamientos de madurador en términos de incremento del azúcar recuperable estimado (ARE % caña) a partir de la sexta semana, la cual se mantuvo por el resto del período de evaluación que se prolongó hasta las 16 semanas después de la aplicación. Es importante resaltar que la respuesta de la caña de azúcar a la dosis de 1.5 L/ha fue muy similar a la obtenida con la dosis de 1.0 L/ha, lo cual demuestra que, de acuerdo con la variedad y las condiciones de humedad en el suelo y del clima que se tuvieron durante la evaluación, la dosis de 1.0 L/ha fue suficiente para producir un buen incremento en la sacarosa con un efecto moderado en el crecimiento de los tallos; a las ocho semanas después de la aplicación los tallos de este tratamiento habían crecido 13 cm menos que el testigo sin madurador y a las 14 semanas la diferencia era de 27 cm. Entre tanto, a las ocho semanas los tallos del tratamiento con la dosis de 1.5 L/ha habían crecido 33 cm menos que los del tratamiento testigo y al cabo de las 14 semanas después de la aplicación, 52 cm menos, sin que por ello se hubiera obtenido un mayor incremento en el contenido de sacarosa de los tallos.

El Cuadro 1 puede usarse como una guía para seleccionar la dosis de los reguladores de crecimiento más usados como maduradores; está basado en las investigaciones realizadas por Cenicaña y en las experiencias obtenidas por los ingenios azucareros en el valle del río Cauca (Villegas y Arcila, 2003). Las mejores respuestas al madurador se obtienen cuando la aplicación se hace entre los 10 y los 12 meses de edad del cultivo y cuando la cosecha se realiza entre las 6 y las 10 semanas después de la aplicación. La correcta dosificación del madurador evita además que se presenten efectos residuales en la soca siguiente que puedan incidir en el normal desarrollo del cultivo.

*La dosis de madurador se debe determinar según la variedad de caña, el tonelaje estimado al momento de hacer la aplicación y la condición de humedad. La selección adecuada del madurador y su dosificación son fundamentales para recuperar una mayor cantidad de sacarosa sin afectar la producción de caña mediante la diferenciación en la altura de corte de los tallos.*

*Las mejores respuestas al madurador se obtienen cuando la aplicación se hace entre los 10-12 meses de edad del cultivo y cuando la cosecha se realiza entre la sexta y la décima semana después de la aplicación.*

*La dosis correcta permite aumentar la sacarosa y además evita que se presenten efectos residuales en la soca siguiente.*

*El Cuadro 1 se puede usar como una guía para seleccionar la dosis de los reguladores de crecimiento más utilizados como maduradores.*

Cuadro 1. Dosis de madurador (según el producto comercial) recomendadas por cada 100 toneladas de caña estimadas al momento de hacer la aplicación (producción estimada) para diferentes variedades de caña de azúcar, de acuerdo con las condiciones climáticas esperadas durante el período comprendido entre la aplicación y la cosecha.

Variedad	Sal isopropilamina de glifosato (L/ha)		Sal monoamonio de glifosato (kg/ha)		Fluazifop-p-butil (L/ha)	
	Época seca	Época lluviosa	Época seca	Época lluviosa	Época seca	Época lluviosa
CC 85-92	0.7	0.9	0.30	0.38	0.4	0.5
CC 84-75	0.8	1.0	0.34	0.42	0.5	0.6
MZC 74-275						
V 71-51	1.0	1.3	0.42	0.55	0.6	0.7
CC 85-68						
PR 61-632	1.3	1.6	0.55	0.68	0.7	0.8
Co 421						

## Efecto de la regulación del crecimiento en la producción

La disminución en el crecimiento de los tallos por efecto de la aplicación del madurador (con una dosificación adecuada) puede variar entre 15-30 cm según la variedad, las condiciones climáticas, el tipo de suelo y el número de semanas transcurridas entre la aplicación y la cosecha. Para evitar que la disminución en el crecimiento tenga efectos negativos en la producción de caña se debe asegurar un manejo adecuado de la dosificación del madurador, de la aplicación y la cosecha (Villegas y Restrepo, 1997).

Es indudable que al momento de la cosecha un tallo que no ha recibido madurador tiene una altura mayor que uno que sí lo ha recibido, tal como se ilustra en la Figura 3.

La longitud del tallo sin madurador es de 320 cm, medida desde la base hasta el último cuello visible, y la longitud del tallo aplicado con madurador es de 290 cm (30 cm de diferencia).

El cogollo verdadero (medido desde el punto natural del quiebre hasta el último cuello visible) es de 40 cm en el tallo sin madurador y de 25 cm en el tallo con madurador. Si al momento de la cosecha se descogollara en ambos casos por el punto natural del quiebre, la longitud del tallo que se enviaría al molino sería de 280 cm en el caso sin madurador y de 265 cm en el caso del tallo con madurador. No obstante, hay que tener en cuenta que la acción del madurador incrementa notoriamente el contenido de sacarosa en el tercio superior del tallo, lo cual justifica que el tallo con madurador se descogolle por el punto natural de quiebre o en el peor de los casos, que se dejen dos entrenudos adheridos al cogollo, los cuales son entrenudos cortos por efecto del regulador de crecimiento y representan una longitud de tallo de 6 cm aproximadamente.

Por su parte, en el tallo sin madurador los últimos entrenudos tienen un contenido muy bajo de sacarosa, lo cual obliga a un descogolle más bajo, de modo que unos cinco entrenudos queden adheridos al cogollo; tales entrenudos son largos y representan unos 35 cm de longitud del tallo, pues no tuvieron el efecto del regulador de crecimiento. Con esta diferenciación en la altura de corte, la longitud final del tallo con madurador que se envía al molino es de 259 cm y la longitud del tallo sin madurador es de 245 cm.

La diferenciación en la altura de corte al momento de la cosecha por parte de los corteros no requiere instrucción o adiestramiento especial para su ejecución, porque la misma condición del cogollo en las cañas aplicadas con madurador le indica al cortero el punto óptimo de corte para aprovechar una mayor cantidad de tallo con alto contenido de sacarosa.

Esta es la razón por la cual en muchos campos comerciales que han recibido la aplicación de madurador se reportan mayores producciones de caña en comparación con campos que no han recibido aplicación, tal como se evidencia en la Figura 4, en la cual se presentan los promedios de la producción de caña en las suertes cosechadas (con aplicación de madurador y sin aplicación) en tres ingenios del valle del río Cauca desde el año 2001 hasta el 2009. En la mayoría de los casos, en las suertes que recibieron madurador se reportaron tonelajes de caña por hectárea superiores a los de aquellas que no recibieron aplicación; además, en varias de las suertes donde se aplicó madurador las edades de cosecha fueron menores.

### **Cenicaña evalúa de forma permanente productos que puedan trabajar como reguladores del crecimiento de la caña de azúcar**

para establecer las dosis adecuadas que permitan obtener los mejores resultados de éstos como maduradores.

Con base en las evaluaciones se han establecido tres factores que se deben tener en cuenta al momento de dosificar el madurador, así:

- 1. Variedad de caña de azúcar.** Se han identificado variedades con mayor susceptibilidad a los reguladores de crecimiento, en las cuales se deben utilizar dosis menores.
- 2. Estado de desarrollo del cultivo.** Aunque los maduradores se aplican después de los diez meses de edad, el estado de desarrollo del cultivo puede variar ostensiblemente según las condiciones edáficas y climáticas que haya tenido el cultivo hasta ese momento. Es por ello que la dosificación del regulador de crecimiento debe hacerse en función de la producción de caña estimada al momento de hacer la aplicación.
- 3. Condición de humedad.** Un contenido óptimo de humedad en el suelo al momento de hacer la aplicación y durante el período comprendido entre la aplicación y la cosecha estimula el crecimiento de los tallos y en estas condiciones se pueden usar dosificaciones mayores en comparación con campos sometidos a estrés, bien sea por déficit o por exceso de humedad. La condición de humedad está muy ligada a la precipitación y al tipo de suelo, en lo que respecta a su capacidad de retención de agua.

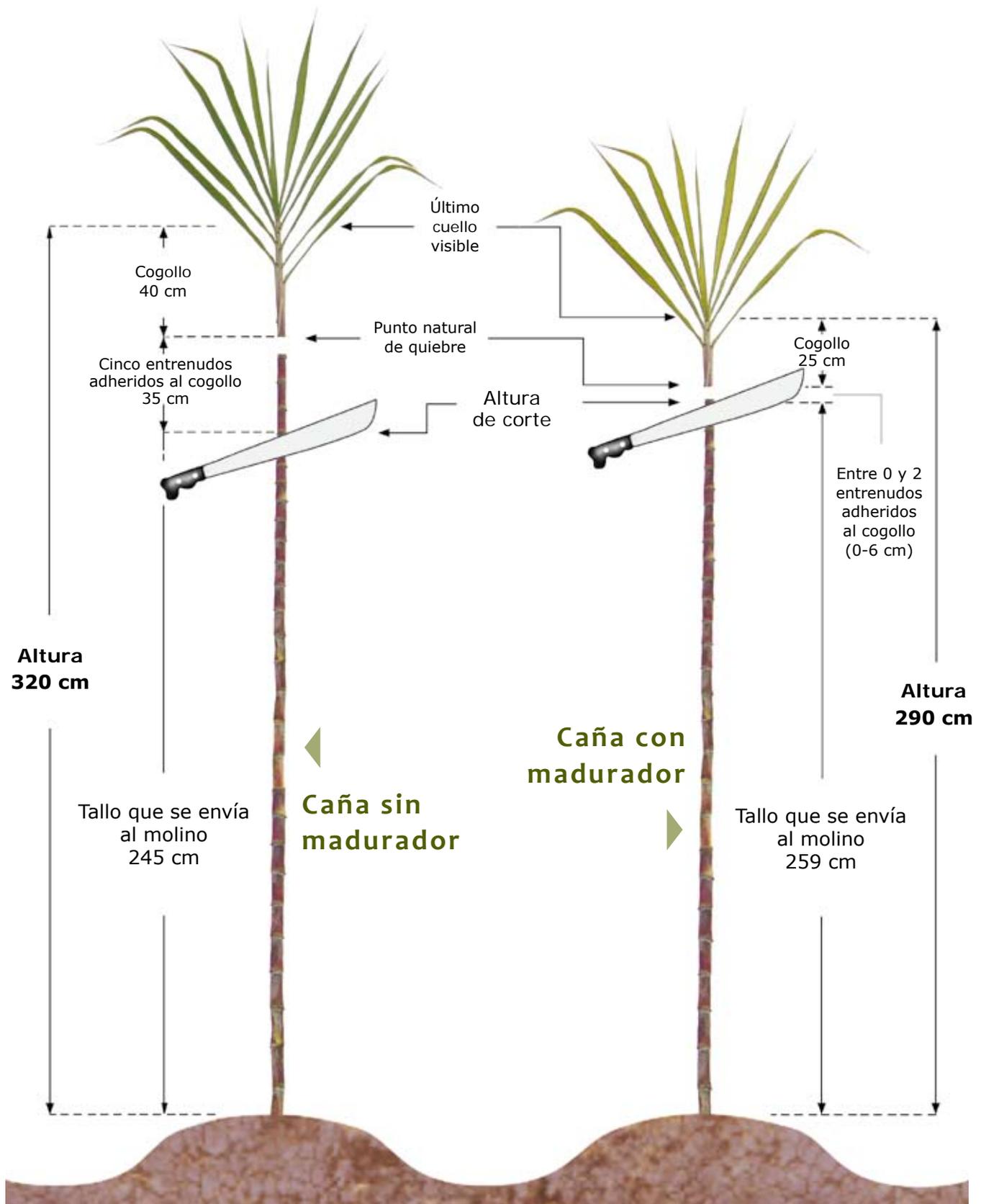


Figura 3. Diferenciación en la altura de corte de tallos de caña de azúcar sin aplicación de madurador y con aplicación.

La acción del madurador incrementa notoriamente el contenido de sacarosa en el tercio superior del tallo, lo cual justifica que el tallo con madurador se descogolle por el punto natural de quiebre o dejando hasta dos entrenudos adheridos al cogollo. Por su parte, en el tallo sin madurador los últimos entrenudos tienen un contenido muy bajo de sacarosa, lo cual obliga a un descogolle más bajo, de modo que unos cinco entrenudos queden adheridos al cogollo. Con esta diferenciación en la altura de corte, la longitud final del tallo con madurador que se envía al molino es mayor que la del tallo sin madurador.

Esta es la razón por la cual en muchos campos comerciales que han recibido la aplicación de madurador se reportan mayores producciones de caña en comparación con campos que no han recibido aplicación, tal como se evidencia en la Figura 4.

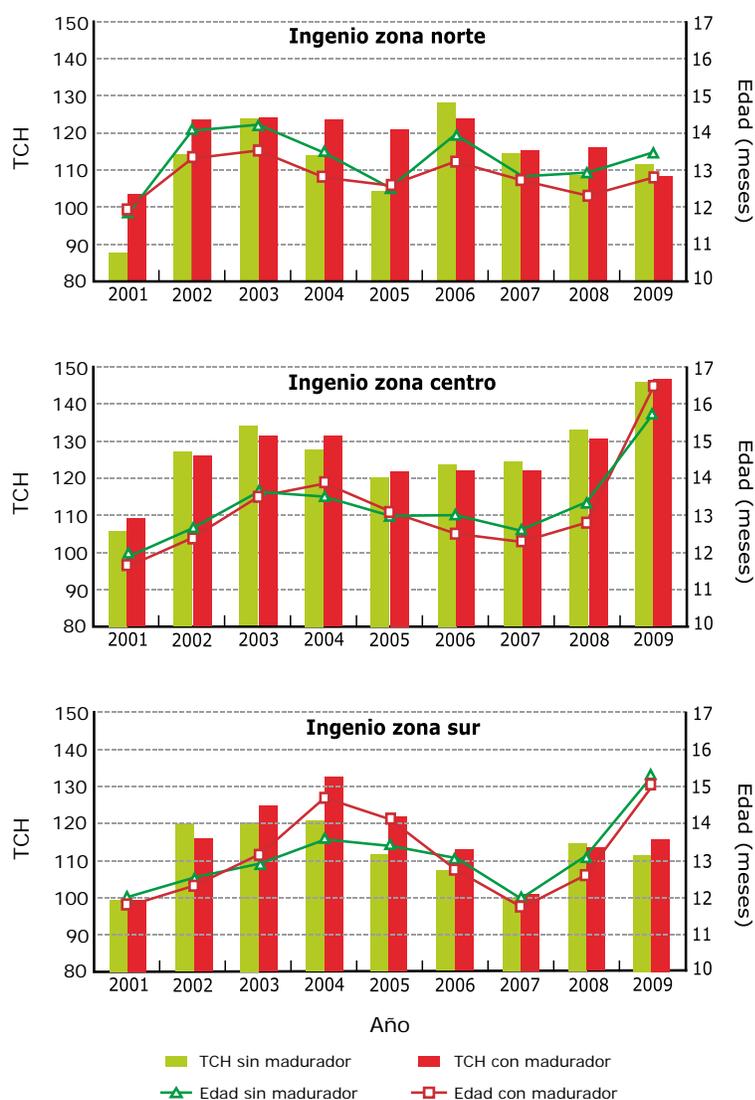


Figura 4. Producciones comerciales sin aplicación de madurador y con aplicación en tres ingenios del valle del río Cauca durante el período 2001–2009.

## Productos alternativos

Aunque los reguladores de crecimiento tienen una efectividad que favorece el aumento de la sacarosa en los tallos dado su modo de acción, con este tipo de maduradores existe el riesgo de causar daño al cultivo objeto de la aplicación o a cultivos vecinos, bien sea por errores en la aplicación o por dosificaciones inadecuadas del producto definidas sin tener en cuenta las condiciones de la planta, el suelo y el clima.

Cenicaña ha evaluado alternativas para inducir la maduración de la caña de azúcar mediante mecanismos completamente diferentes a la regulación del crecimiento, como es el caso del estímulo de los procesos fisiológicos en la planta que puedan mejorar la producción de sacarosa, su transporte y almacenamiento. Con este propósito se han evaluado productos que en su mayoría son fertilizantes foliares, entre los cuales se destacan las formulaciones a partir de algunos macroelementos como el potasio y el fósforo, algunos aminoácidos, microelementos y fitohormonas.

Dado que el potasio cumple funciones importantes en la planta en relación con los procesos de síntesis, desplazamiento y almacenamiento de azúcares, éste es uno de los principales componentes de los fertilizantes foliares evaluados en caña de azúcar con el propósito de conseguir incrementos en el contenido de sacarosa de los tallos. Entre los productos evaluados como posibles maduradores se encuentran Bioticón, K-Fol®, Agrofos-K®, Agroticón®, B-zucar® y Cosmomadurador®, que si bien producen incrementos en el contenido de sacarosa de los tallos que pueden alcanzar en el mejor de los casos de 0.5 a 0.8 unidades porcentuales, sus resultados distan bastante de los que se obtienen con los reguladores de crecimiento y por consiguiente su uso comercial se limita a aplicaciones en pequeñas áreas exploratorias.

No obstante la menor eficacia de los maduradores alternativos, Cenicaña continuará las investigaciones con este tipo de productos para determinar si dosificaciones diferentes a las que se han utilizado hasta el momento, cambios en los volúmenes de mezcla y en las épocas de aplicación, pueden contribuir a mejorar su eficacia y de esta forma contar con alternativas más amplias para la maduración de la caña de azúcar.

## **Conclusiones**

En el valle del río Cauca se cosecha la caña de azúcar a lo largo de todo el año y por tanto las condiciones en las cuales ocurre la maduración son muy variables. El contenido de sacarosa en los tallos depende en buena parte del ritmo de crecimiento que tengan los tallos durante el período de maduración, en lo cual tienen gran influencia la fertilidad del suelo, la disponibilidad de humedad y el tiempo climático, especialmente la precipitación, durante las últimas semanas del período de cultivo.

El uso de maduradores que actúan como reguladores de crecimiento evita que las reservas de sacarosa sean utilizadas por la planta en altas cantidades en los puntos de crecimiento durante el período final del ciclo del cultivo y permite obtener una mayor cantidad de sacarosa en los tallos al momento de la cosecha.

La selección adecuada del madurador y su dosificación de acuerdo con la variedad por aplicar, el tonelaje estimado al momento de la aplicación y la disponibilidad de humedad que tendrá el cultivo entre la aplicación y la cosecha, en lo cual se debe tener en cuenta el tipo de suelo y la precipitación esperada, son fundamentales para lograr el objetivo de recuperar una mayor cantidad de sacarosa sin afectar la producción de caña mediante la diferenciación en la altura de corte.

La excelente respuesta de la variedad CC 85-92 a los maduradores, que permite cosechar caña con altos contenidos de sacarosa, unida a la característica de una gran capacidad de crecimiento que le permite obtener altas producciones de caña, han hecho de esta variedad la de mayor producción de azúcar, razones por las cuales es actualmente la variedad más sembrada en el valle del río Cauca.

Colombia ocupa el primer lugar en productividad en términos de toneladas de azúcar por hectárea y por año entre los países productores de azúcar. Este lugar preponderante se ha alcanzado principalmente por la vía de producción de caña gracias a las condiciones favorables que hacen que los tallos crezcan permanentemente y a una tecnología de producción que involucra riego suplementario y un número importante de labores de cultivo que hacen que los costos de producción sean de los más altos. Para lograr una mayor rentabilidad se requiere aumentar el contenido de sacarosa al momento de la cosecha y en este sentido los maduradores reguladores de crecimiento son una gran ayuda. Se espera que mediante las investigaciones que adelanta Cenicaña se pueda contar en el futuro con productos alternativos eficientes que permitan lograr el mismo propósito con mecanismos de acción diferentes.

## **Referencias bibliográficas**

- Villegas T., F. y Arcila A., J. 2003. Maduradores en caña de azúcar. Manual de procedimientos y normas para su aplicación. Cenicaña, Cali. 66p. (Serie Técnica No.32)
- Villegas T., F. y Restrepo, L. 1997. Altura óptima de corte en caña con madurador. V.1, p.381-399. En: Congreso de la Sociedad Colombiana de Técnicos de la Caña de Azúcar. 4. Memorias. Cali, Colombia. 24-26 septiembre. Tecnicaña, Cali, Colombia.
- Villegas T., F. y Torres, J.S. 1993. El madurante y la producción. Cenicaña, Cali. 4p. (Serie Divulgativa No.2)

# Medición experimental y evaluación económica del consumo de combustible en equipos de transporte de caña

Jorge Eduardo Bravo, Alejandro Estrada B., Adolfo León Gómez P., Camilo H. Isaacs E., Pedro Wirley Castro F.\* y Litzman Bejarano R.\*\*

## Introducción

El objetivo general de los proyectos coordinados por Cenicaña en el sector azucarero en relación con el sistema de corte de caña, alce, transporte y entrega de la materia prima a la fábrica (CATE) es mejorar los estándares tecnológicos y la logística del sistema para disminuir los costos de producción y obtener mejoras económicas en el sector.

De acuerdo con lo anterior, se trabaja en el diseño y la construcción de un nuevo prototipo de tren de vagones de transporte de caña que involucre la reducción del peso de éstos con respecto a los vagones utilizados actualmente, con la hipótesis de que la reducción de peso de los vagones producirá un ahorro considerable de combustible del vehículo motor del tren (si se transportara la misma cantidad de caña) o una disminución de los costos logísticos de cosecha (si el ahorro en peso por menos acero es reemplazado por caña adicional transportada).

En este documento se presentan los resultados experimentales encontrados para la relación entre el peso transportado y el consumo de combustible para un tren cañero en un ingenio piloto. A partir de las relaciones entre el peso transportado y el consumo de combustible se tiene una proyección de ahorro de aproximadamente el 5% en el consumo de combustible, lo cual valida los resultados arrojados por el modelo teórico desarrollado por Ascuntar (2008).

## Aspectos metodológicos y desarrollo del experimento

A continuación se presenta la descripción general de las pruebas de consumo de combustible y la estructura de costos utilizada para la evaluación económica.

### Pruebas de consumo de combustible

Se realizaron dos pruebas con diferentes configuraciones de trenes de vagones de transporte utilizando vagones HD 12000 y un tractor CASE 9230, este último instrumentado con un medidor de flujo de combustible AIC-888 (con 1% de precisión de lectura, 800 pulsos por litro de flujo de combustible y repetibilidad del 0.2% de la lectura), un dinamómetro de tiro, un registrador digital dinámico de microdeformaciones y un equipo de posicionamiento global GPS. Con dicha instrumentación se recolectaron datos de consumo instantáneo de combustible, fuerza en el tiro, velocidad del tren y tiempo de los diferentes eventos en las pruebas.

- **Prueba No. 1:** Para cinco configuraciones de trenes de transporte (Cuadro 1) se recolectaron datos durante un circuito interno en el ingenio a fin de obtener información con cinco pesos remolcados diferentes. La longitud del circuito interno fue de 4308 metros y se realizaron dos ciclos de muestreo por cada configuración del tren. El tiempo de cada ciclo de muestreo fue de cuatro minutos aproximadamente.
- **Prueba No. 2:** En el Cuadro 2 se presentan las dos configuraciones de trenes de transporte evaluadas en esta prueba. Se tomaron datos para un ciclo completo de cosecha que se inició con la salida del tren vacío de las instalaciones del ingenio, el tránsito en carretera nacional pavimentada, el tránsito en carretera secundaria destapada y pavimentada, el cargue de caña larga con tiro directo con alzadora y el regreso del tren lleno hasta el ingenio. La longitud del ciclo completo de cosecha fue de 40 kilómetros y tardó 1 hora y 55 minutos.

Cuadro 1. Configuraciones de trenes de vagones de transporte de caña utilizados en la prueba No.1.

Tren	Vagones (No.)	Estado del tren	Peso remolcado (kg)
1	4	Cargado con caña larga	79,040
2	3	Cargado con caña larga	58,810
3	2	Cargado con caña larga	39,250
4	4	Vacío	35,570
5	3	Vacío	26,430

\* Ingeniero Mecánico, Investigador Temporal <jbravo@cenicana.org>; Ingeniero Agroindustrial, Ingeniero de Logística <aestrada@cenicana.org>; Ingeniero Mecánico, M.Sc., Asesor en Procesos Mecánicos <algomez@cenicana.org>; Ingeniero Agrónomo, Jefe Servicio de Cooperación Técnica y Transferencia de Tecnología <chisaacs@cenicana.org>; Ingeniero Mecánico, Investigador Temporal <pwcastro@cenicana.org>. Todos de Cenicaña.

\*\* Ingeniero Mecánico, Jefe de Cosecha del Ingenio Pichichí <lbejarano@ingeniopichichi.com>

Cuadro 2. Configuraciones de trenes de vagones de transporte de caña utilizados en prueba No.2.

Tren	Vagones (No.)	Estado del tren	Peso remolcado (kg)
1	4	Cargado con caña larga	73,600
2	4	Vacío	35,610

### Evaluación económica

Con precios del año 2009 se hizo la valoración del costo de operación del tractor utilizado en las pruebas de transporte de caña de acuerdo con la siguiente estructura de costos: suministros, reparaciones, combustible, lubricantes, llantas y operario. Se analizaron tres casos de operación: (1) Tren de vagones actual (referencia); (2) Reducción de 10% en el peso del tren de vagones; (3) Reducción de 10% en el peso del tren vagones y aumento de 10% en el peso de la caña transportada.

### Resultados

#### Consumo de combustible

- **Prueba No. 1:** Los resultados de la medición instantánea del consumo de combustible muestran el efecto del peso remolcado en el consumo de combustible del tractor (Figura 1). En las cinco configuraciones de trenes se observó un patrón similar de la dinámica de consumo de combustible en el tiempo; además, se observó que a medida que aumentó el peso transportado también fue mayor el consumo instantáneo de combustible del tractor. El consumo de combustible en ralentí (tren vacío) para cada ciclo de muestreo sólo se tuvo en cuenta al inicio de la prueba.

En la Figura 2 se muestra el análisis del efecto de la velocidad de tránsito en el consumo de combustible según el peso

remolcado. Las ecuaciones lineales obtenidas permiten predecir el consumo de combustible para un peso remolcado determinado en eventos con velocidad y consumo de combustible constantes, de modo que se minimiza el efecto de la intervención del tractorista en la evaluación. Se confirmaron las observaciones acerca del efecto del peso remolcado en el consumo de combustible que se habían mostrado en la Figura 1; además, se determinó que a menor velocidad de tránsito fue menor el consumo de combustible del tractor. Vale anotar que al disminuir la velocidad de tránsito se reduce también el número de ciclos de transporte que puede realizar el equipo en un período determinado.

Los valores de consumo de combustible obtenidos mediante las ecuaciones lineales indicadas en la Figura 2 fueron ordenados a fin de estimar el ahorro de combustible que se puede lograr mediante la reducción del peso remolcado. Los resultados se muestran en la Figura 3 para dos velocidades de tránsito y reducciones del peso entre 5-20%.

Finalmente, con los datos experimentales de consumo de combustible y fuerza de tiro se obtuvo

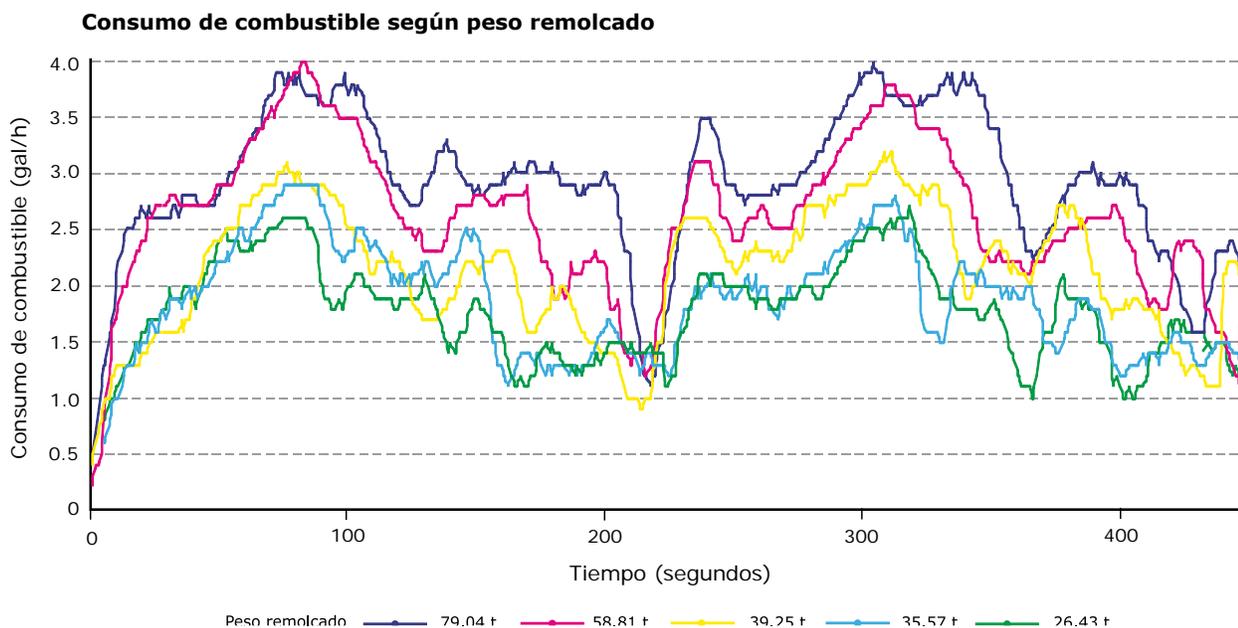


Figura 1. Medición experimental del consumo instantáneo de combustible según el peso remolcado. Prueba No. 1.

la energía invertida por el tractor para remolcar cada tren, según las configuraciones utilizadas en la prueba (Figura 4). Se observó que a medida que se aumentó el peso transportado la energía de tracción utilizada para realizar la operación fue mayor (tendencia exponencial creciente).

- **Prueba No. 2:** En la Figura 5 se muestra que el consumo instantáneo de combustible varió entre 0.5-4.0 galones por hora durante el ciclo de transporte por efecto del tipo de carretera, el peso transportado y las condiciones del alce. Se observó una diferencia importante en el consumo instantáneo de combustible del tractor entre el tren vacío y el tren cargado de caña, lo cual indica que al usar vagones más livianos se puede lograr un ahorro de combustible durante el tránsito de los vagones vacíos en una medida proporcional a la disminución de peso de dichos vagones.

Con base en la información recolectada en el ciclo completo de cosecha fue posible predecir el efecto de la velocidad de tránsito en el consumo de combustible para un mismo peso remolcado. Se observó que después de determinados valores de velocidad el consumo de combustible tendió a estabilizarse (Figura 6).

### Evaluación económica

La valoración de los costos de operación se presenta en el Cuadro 3, con la observación de que la carga total transportada es igual en los casos 1 y 3 y menor en el caso 2. Así, al comparar los casos 2 y 3 con respecto al caso 1 se observa que el costo total de transporte (\$/t) es 1.64% más bajo en el caso 2 (menor peso de vagones y menor consumo de combustible) y 8.6% más bajo en el caso 3 (menor peso de vagones, mayor peso de caña e igual consumo de combustible). Además, se observa que el costo total de transporte es 7.1% inferior en el caso 3 con respecto al caso 2, pues aunque el consumo de combustible es más alto en el caso 3 por el mayor peso transportado, dicho peso está representado por mayor cantidad de caña.

De este análisis se concluye que si se reduce en 10% el peso del tren de vagones (por menos acero en la fabricación) y este mismo porcentaje se suma en peso de caña transportada es posible disminuir en 9% el costo de la tonelada de caña transportada con respecto al escenario actual.

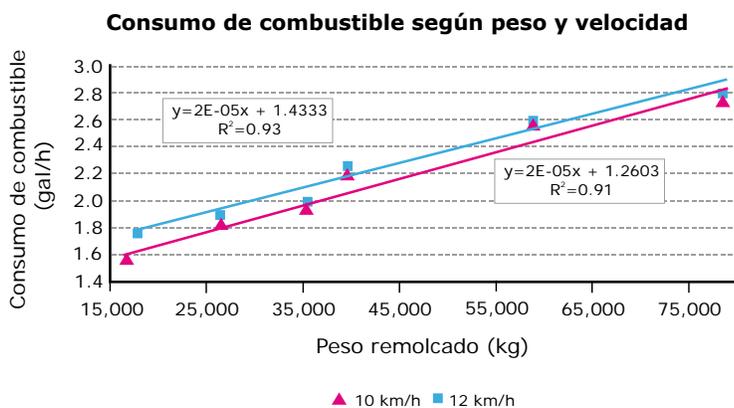


Figura 2. Consumo de combustible según el peso remolcado y la velocidad de tránsito en eventos sin aceleraciones. Prueba No.1.

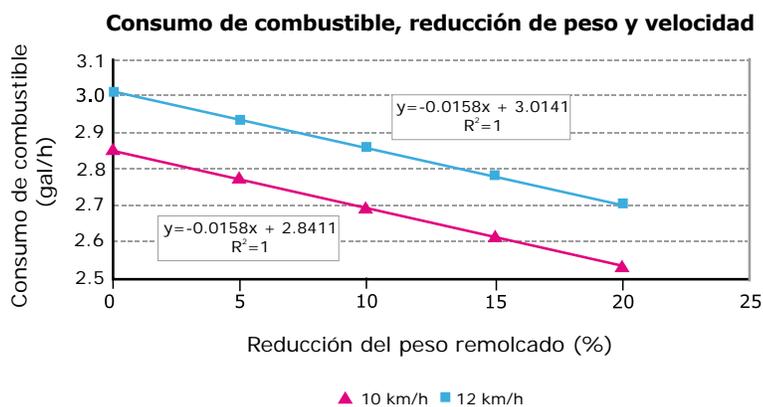


Figura 3. Consumo de combustible según el porcentaje de reducción en el peso remolcado y la velocidad de tránsito. Prueba No.1.

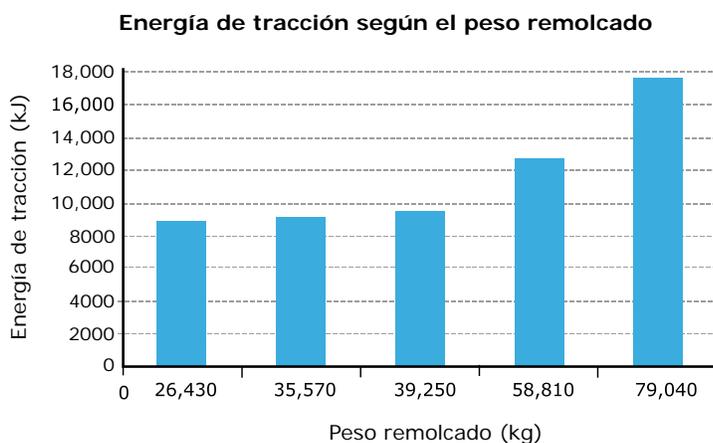
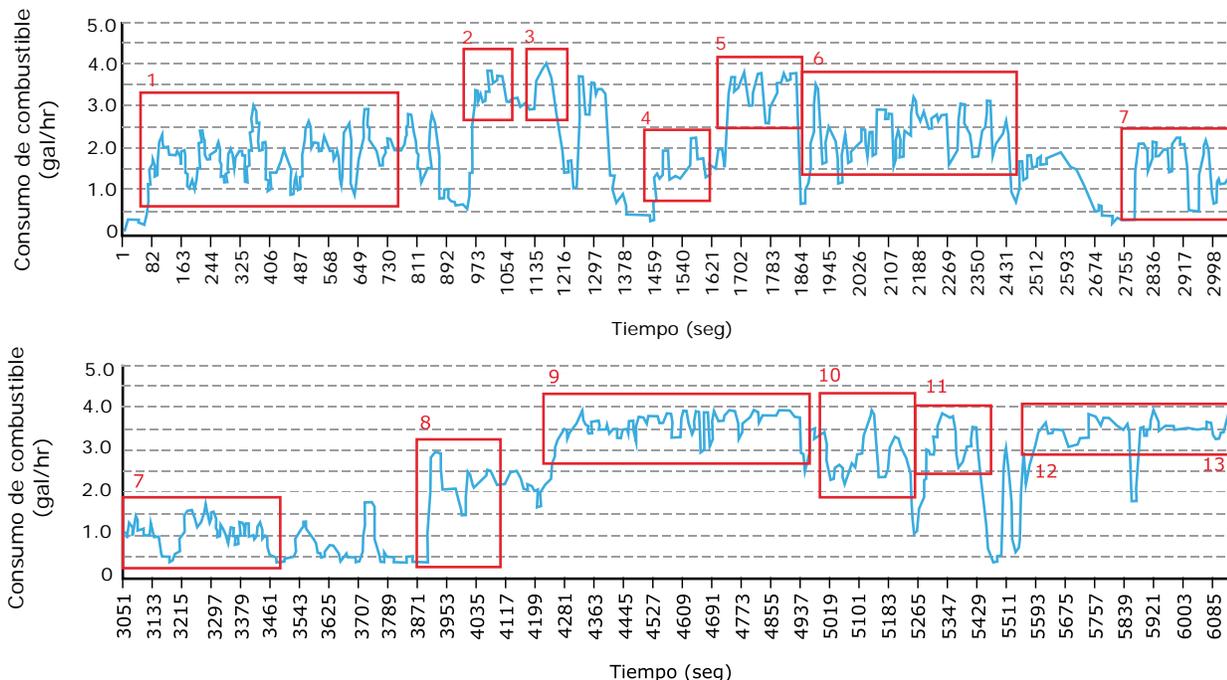


Figura 4. Energía de tracción utilizada según el peso remolcado (estimada con base en el consumo de combustible y la fuerza de tiro). Prueba No.1.

### Consumo instantáneo de combustible en un un ciclo de cosecha completo



#### Tramos de recorrido del equipo de transporte indicados en la figura:

- |  |   |
|--|---|
| 1. Salida del ingenio por carretera pavimentada en mal estado (vagones vacíos) | 7. Cargue de caña (tiro directo con dos vagones)      |
| 2. Carretera pavimentada (vagones vacíos)                                      | 8. Salida del frente de corte (cuatro vagones llenos) |
| 3. Puente Guacarí (vagones vacíos)   | 9. Carretera destapada (vagones llenos)               |
| 4. Carretera intermedia destapada (vagones vacíos)                             | 10. Carretera intermedia pavimentada (vagones llenos) |
| 5. Carretera intermedia pavimentada (vagones vacíos)                           | 11. Carretera intermedia destapada (vagones llenos)   |
| 6. Carretera destapada (vagones vacíos)  | 12. Puente Guacarí (vagones llenos)                   |
|  | 13. Carretera pavimentada (vagones llenos)            |

Figura 5. Consumo instantáneo de combustible en un ciclo de cosecha completo. Prueba No. 2.

### Consumo de combustible según variación de velocidad

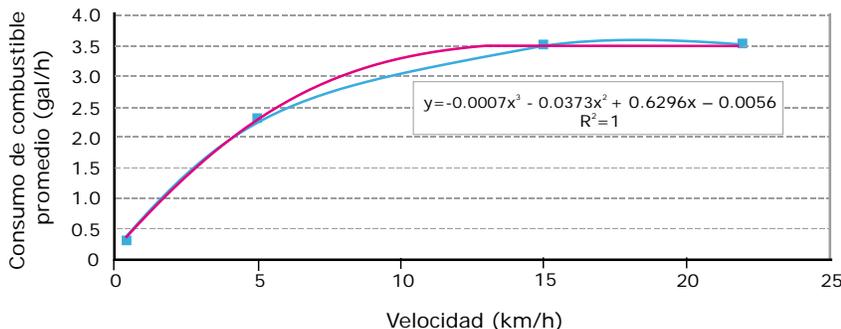


Figura 6. Efecto de la variación de la velocidad de tránsito sobre el consumo de combustible. Prueba No. 2.

Cuadro 3. Costos relativos (en porcentaje y tomando como referencia el Caso 1) de la operación de transporte de caña con un tren de cuatro vagones HD 1200 remolcados por un tractor Case 9230 (escenario actual).

Detalle de costos	Unidad	Caso 1 *	Caso 2 **	Caso 3 ***
<b>Datos básicos</b>				
Peso de cada vagón (tara)	t	8.9	8.01	8.01
Peso de la caña transportada por vagón	t	9.5	9.5	10.39
Peso total remolcado por tren (4 vagones + caña)	t	73.6	70.04	73.6
Consumo de combustible del tractor	gal/h	2.20	2.09	2.20
<b>Costo tractor Case 9230</b>				
Combustible (\$/h)	%	37	35	37
Operario (\$/h)	%	25	25	25
Mantenimiento (\$/h)	%	22	22	22
Costos fijos (\$/h)	%	16	16	16
Subtotal (\$/h)	%	100	98	100
Subtotal (\$/t)	%	100	98	91
<b>Costo vagón HD 12000</b>				
Mantenimiento (\$/h)	%	70	70	70
Costos fijos (\$/h)	%	30	30	30
Subtotal (\$/h)	%	100	100	100
Subtotal (\$/t)	%	100	100	91
<b>Costo de transporte</b>				
Total (tractor + 4 vagones, \$/t)	%	100	98	91

\* **Caso 1:** Escenario actual (utilizado como referencia para la valoración económica de los demás casos). Corresponde a un tren de transporte compuesto por cuatro vagones HD 12000 cargados con caña y remolcados por un tractor Case 9230.

\*\* **Caso 2:** Se diferencia del caso 1 porque se redujo el peso del tren de vagones en 10%.

\*\*\* **Caso 3:** Se diferencia del caso 1 porque se redujo el peso del tren de vagones en 10% y se aumentó el peso de la carga de caña en 10%.

## Conclusiones y recomendaciones

- Con las pruebas experimentales de medición del consumo de combustible se validó el modelo teórico propuesto por Ascuntar (2008) para el efecto. Se confirmó que una reducción de 10% en la tara del tren de vagones de transporte de caña representa una disminución de 5% en el consumo de combustible del tractor remolcador.
- La disminución de la tara de los equipos de transporte por sí misma o en combinación con el aumento de la capacidad de carga del tren (mayor cantidad de caña transportada) causó una reducción del costo de la operación de transporte de caña.
- La evaluación económica mostró que al reemplazar el 10% del peso (acero) de un tren de vagones por igual peso en caña se reduce en 9% el costo total de transporte de cada tonelada de caña larga transportada.
- El valor del consumo de combustible del tractor CASE 9230 estimado a partir de las mediciones experimentales fue de 2.2 galones por hora.
- Se recomienda continuar las pruebas experimentales para caracterizar las velocidades de tránsito asociadas con el mínimo consumo de combustible en el transporte de caña, de modo que se puedan establecer parámetros de la conducción del operador del tractor y estandarizar las velocidades y las aceleraciones para tal fin.

## Referencia bibliográfica

Ascuntar D.A. 2008. Conceptos y criterios técnicos del diseño dinámico de un vagón para el transporte de caña de azúcar. Universidad del Valle. Cali. 181 p.

*Una organización comprometida con la excelencia en investigación y servicios.*

*Entidad sin ánimo de lucro que desde su fundación en 1977 se financia principalmente con aportes directos de los ingenios azucareros y los proveedores de caña de azúcar localizados en el valle geográfico del río Cauca.*

► **Servicios de diagnóstico de enfermedades en semilleros y cultivos comerciales, importación y cuarentena de variedades de caña de azúcar**

Laboratorio de Fitopatología en la Estación Experimental, ext.5150 ó 5139

<[www.cenicana.org/servicios/diagnostico\\_enfermedades.php](http://www.cenicana.org/servicios/diagnostico_enfermedades.php)>

Importación de variedades: Jorge I. Victoria, ext.5127 <[jvictoria@cenicana.org](mailto:jvictoria@cenicana.org)>

► **Servicios de análisis de suelos y análisis foliar y recomendaciones de fertilización y enmiendas para el cultivo de la caña de azúcar**

Laboratorio de Química en la Estación Experimental, ext.5149

<[www.cenicana.org/servicios/analisis\\_suelo.php](http://www.cenicana.org/servicios/analisis_suelo.php)>

Sistema experto de fertilización, SEF v.2009

<[www.cenicana.org/aeps/sef.php](http://www.cenicana.org/aeps/sef.php)>

► **Preguntas frecuentes y consultorio tecnológico**

Servicio de Cooperación Técnica y Transferencia de Tecnología, ext.5168

<[www.cenicana.org/banco\\_preguntas/index.php](http://www.cenicana.org/banco_preguntas/index.php)>

► **Sistema SqrF: Sugerencias, quejas, reclamos y felicitaciones**

Grupo de Respuesta al Cliente, ext.5179 ó 5133

<[www.cenicana.org/grc/index.php](http://www.cenicana.org/grc/index.php)>



**Si usted es donante de Cenicaña y quiere registrarse para obtener los servicios de información disponibles en nuestro sitio web, comuníquese con nosotros o visítenos en la Estación Experimental.**

Servicio de Cooperación Técnica y Transferencia de Tecnología, ext.5168

<[www.cenicana.org/hoja\\_registro\\_pag.php](http://www.cenicana.org/hoja_registro_pag.php)>

## Apreciado lector...

Si cambia de dirección postal o de dirección electrónica, por favor, infórmenos. Sólo así podrá continuar recibiendo nuestras publicaciones impresas y nuestros boletines electrónicos.

Remita sus datos actualizados incluyendo: Nombres y apellidos, cédula de ciudadanía, dirección postal y de correo electrónico, teléfono, fax, afiliación institucional y NIT de la empresa, nombres de la(s) hacienda(s) y el ingenio relacionado.

Rte/ Servicio de Cooperación Técnica y Transferencia de Tecnología. Cenicaña.

Dirección postal: Calle 58 norte N° 3BN-110. Cali, Colombia.

[buzon@cenicana.org](mailto:buzon@cenicana.org)



### Estación Experimental

Via Cali-Florida km 26  
San Antonio de los Caballeros  
(Florida, Valle del Cauca)

<[www.cenicana.org/rutas.php](http://www.cenicana.org/rutas.php)>

Teléfono (57) (2) 687 66 11

Fax (57) (2) 260 78 53

www.4-72.com.co

472  
LA RED POSTAL DE COLOMBIA

► Línea de Atención al Cliente Nacional ◀  
01 8000 111210

Tarifa Postal Reducida No. 2010-129

4-72 La Red Postal de Colombia

Vence 31 de diciembre de 2010