

# EFECTO DEL ESTRÉS POR SOBRESHUMEDECIMIENTO DEL SUELO EN LA DINÁMICA DEL ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR EN CAÑA DE AZÚCAR (*Saccharum spp. híbr.*)

S. Rodríguez<sup>✉</sup>, W. Torres, E. Ortega, Rosa Rodés, J. Dell'Amico, S. Meneses, E. Jerez y G. López

**ABSTRACT.** In Cuba, a great part of its agricultural extension is developed in soils prone to waterlogging, and inside this one a nonworthless area is devoted to sugarcane crop, it being a preponderant example in Valle del Cauto, in the eastern part of the country. The effects that this stress type causes on Leaf Area Index (IAF) dynamics of a Vertisol of Valle del Cauto, Granma province, on which sugarcane is grown is the main objective. Therefore, the genotypes C86-456, C90-469, C86-12, C87-51, C1051-73 and C120-78 were chosen. One experiment was planted with two big plots: one without waterlogging and the other one subjected to this stress, in a split plot design at random blocks with five repetitions, evaluating at plant cane and first ratoon of 12-month cycles. Genotypes were considered subplots. The quantity of active leaves, limb length and width were measured to estimate IAF. Monthly actual evapotranspiration and its components were calculated. Results were statistically processed through t student test and principal coordinate analysis. Soil flooding reduced significantly sugarcane IAF dynamics with varietal differences, while this dynamics has been markedly influenced by soil moisture and this in turn by evapotranspiration. The utility of minimum spanning trees (ARM) in multidimensional scaling was proved.

**Key words:** stress, waterlogging, sugarcane, leaf area index, soil

**RESUMEN.** En Cuba, una gran parte de su extensión agrícola se desarrolla en suelos proclives al encharcamiento y dentro de esta un área no despreciable está dedicada al cultivo de la caña de azúcar, siendo un ejemplo preponderante el Valle del Cauto, en la región oriental del país. Sobre los efectos que ocasiona este tipo de estrés en la dinámica del índice de área foliar (IAF) de un Vertisol del Valle del Cauto, en la provincia Granma, el cual se cultiva con caña de azúcar, es el objetivo central. Para esto se escogieron los genotipos C86-456, C90-469, C86-12, C87-51, C1051-73 y C120-78. Se plantó un experimento con dos parcelas grandes: una sin sobreshumedecimiento y la otra con presencia de este estrés, en un diseño de parcelas divididas en bloques al azar, con cinco réplicas, evaluándose en ciclos de caña planta y primer retoño de 12 meses. Se consideró a los genotipos como las subparcelas. Mensualmente se midieron la cantidad de hojas activas, el largo y ancho del limbo, estimándose a partir de aquí el IAF. Se calculó la evapotranspiración real mensual y sus componentes. Los resultados se procesaron estadísticamente mediante t de *student* y a través de un análisis de coordenadas principales. Se encontró que el exceso de agua en el suelo redujo significativamente la dinámica del IAF de la caña de azúcar, con diferencias varietales, mientras que esta dinámica tiene marcada influencia de la humedad del suelo y esta a su vez por la evapotranspiración. Quedó demostrada la utilidad del empleo de los árboles de recorrido mínimo (ARM) en escalamientos multidimensionales.

**Palabras clave:** estrés, anegamiento, caña de azúcar, índice de superficie foliar, suelo

## INTRODUCCIÓN

Las plantas, y dentro de estas las de interés agrícola y económico, se ven sometidas a varios tipos de estrés, uno de los cuales es el exceso de agua en el suelo,

causando en dependencia del suelo, cultivo y su duración, diferentes afectaciones por las limitaciones con el oxígeno necesario para la respiración. Los problemas de mal drenaje natural en áreas agrícolas, pueden ser causados por numerosos factores: lluvias excesivas por tiempo prolongado, condiciones topográficas desfavorables, desbordamiento de ríos y arroyos, baja capacidad de infiltración del agua en algunos suelos que presentan estratos cercanos a la superficie casi impermeable y ascensos prolongados de las aguas subterráneas hasta alcanzar niveles cercanos a la superficie del terreno (1). Esta problemática necesita del conocimiento de los aspectos fundamentales de la respuesta de los cultivos a estas condiciones (2).

Ms.C. S. Rodríguez, Investigador Agregado y Dr.C. S. Meneses, Profesor Titular del Centro de Estudios de Biotecnología Vegetal, Universidad de Granma (UDG), carretera a Manzanillo, km 17.5, Peralejo, Bayamo CP 85100, Granma; Dr.C. W. Torres; Dr.C. J. Dell'Amico y Dr.C. E. Jerez, Investigadores Titulares del Departamento de Fisiología y Bioquímica, Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas, Gaveta Postal 1, San José de las Lajas, La Habana; Dr.C. E. Ortega y Dra.C. Rosa Rodés, Investigadores Titulares, Universidad de La Habana; G. López, Especialista del GESA, MINAZ, Granma.

✉ srrguez@udg.co.cu

En Cuba existen más de 2 800 000 ha con problemas de mal drenaje de los suelos, incluidas 271 000 ha de caña de azúcar (3). Este exceso de agua causado por encharcamiento amenaza la sostenibilidad de cualquier producción. La identificación y el uso de genotipos tolerantes es una manera de reducir la pérdida del cultivo debido a este tipo de estrés, constituyendo un buen indicador la dinámica del índice de área foliar, por su estrecha relación con la capacidad fotosintética de la planta y la evapotranspiración.

Sobre lo anterior, el objetivo propuesto fue evaluar las afectaciones que provoca el sobrehumedecimiento del suelo en la dinámica del índice del área foliar de variedades de caña de azúcar, con distintos grados de tolerancia a este estrés, plantados en un suelo proclive al encharcamiento, el cual es predominante en la región del Valle del Cauto, donde la caña de azúcar es uno de los principales cultivos que se explotan económicamente en la actualidad.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Los experimentos se desarrollaron en un suelo Vertisol pélico gléyico carbonatado (4) de la Empresa Azucarera Grito de Yara, Río Cauto, Granma, siguiendo las Normas y Procedimientos del Programa de Mejoramiento Genético de la Caña de Azúcar en Cuba del Instituto Nacional de Investigaciones de la Caña de Azúcar (5). Cada experimento se concibió en bloques completos al azar, con cinco réplicas de 48 m<sup>2</sup> (cuatro surcos de 7.5 m de largo a 1,60 m entre surcos). En el experimento no sobrehumedecido se adoptaron todas las medidas fitotécnicas para que el exceso de agua en el suelo fuera nulo, pero con riego por gravedad en los primeros cuatro meses, para garantizar la brotación y el ahijamiento. El otro experimento, separado a una distancia de 10 m para evitar la infiltración lateral del agua y bajo el mismo tipo de suelo, se concibió con la presencia del factor anegamiento. Para esto se preparó un dique de 50 cm de altura que lo bordeara, para evitar la escorrentía libre del agua, y se aplicó una lámina de agua de 40 cm a partir de los 120 días de haber sido plantado y cortada la caña planta, una vez cada 10 días, hasta los 300 días o 10 meses, excepto cuando las precipitaciones elevaran la lámina de agua hasta los 40 cm. No se permitió que el anegamiento fuera mayor de tres días. Se eludieron los primeros 120 días desde la plantación y después de la cosecha de la caña planta, por ser la etapa más susceptible al sobrehumedecimiento (6). Desde el momento de la plantación y después de la cosecha de la caña planta hasta los 120 días, a ambos experimentos se les aplicó riego por gravedad con una norma neta parcial de 237 m<sup>3</sup>.ha<sup>-1</sup>, cada 12 días, para garantizar homogeneidad en la brotación y el ahijamiento, manteniéndose el riego en el experimento no sobrehumedecido hasta los 12 meses.

Las variedades empleadas fueron C86-456, C90-469, C86-12, C87-51, C1051-73 y C120-78. Se seleccionó como material de plantación los entrenudos de tres yemas procedentes del banco de semilla básica, con tratamiento

térmico y químico. Se plantaron dos entrenudos en el fondo del surco, de forma corrida, garantizándose una población superior al 98 % en los experimentos. La plantación se realizó en enero del 2002, evaluándose en los ciclos de caña planta y primer retoño hasta los 12 meses. Las labores fitotécnicas realizadas a los experimentos, aparte del manejo del agua de riego abordada anteriormente, fueron seis limpiezas y un aporque, todos de forma manual, mientras que la fertilización fue la establecida por el Servicio de Recomendaciones de Fertilizantes y Enmiendas (SERFE) del INICA. Se registraron las precipitaciones, temperatura media del aire y se determinó la humedad presente en el suelo a los 30 cm de profundidad por el método gravimétrico, ambos en todo el período del experimento.

Las precipitaciones y temperaturas decenales fueron representadas de forma gráfica (barras para las precipitaciones y puntos de dispersión para las temperaturas) para cada año de los ciclos de cosecha correspondientes. Ambas variables sirvieron para caracterizar climáticamente los años a través del índice de aridez de Gausson y Bagnouls (7). De acuerdo con este índice, un mes, en este caso decena es considerada seca, cuando en magnitud, el doble de la temperatura media decenal está por encima de la lluvia caída en esa decena y, es húmeda, si el doble de la temperatura media decenal es inferior a la lluvia precipitada.

*Índice de área foliar.* El cálculo del IAF se estableció a través de la metodología establecida en las Normas y Procedimientos del Programa de Mejoramiento Genético de la Caña de Azúcar en Cuba del INICA (4), a partir de las mediciones de la cantidad de hojas activas, el ancho y largo del limbo y el número de tallos molibles por plantón. Para esto se tomaron tres plantones seleccionados al azar de los genotipos C86-12 y C120-78, por réplica, en caña planta y primer retoño, y para las dos condiciones de humedad del suelo en cada mes del ciclo vegetativo hasta los 12 meses.

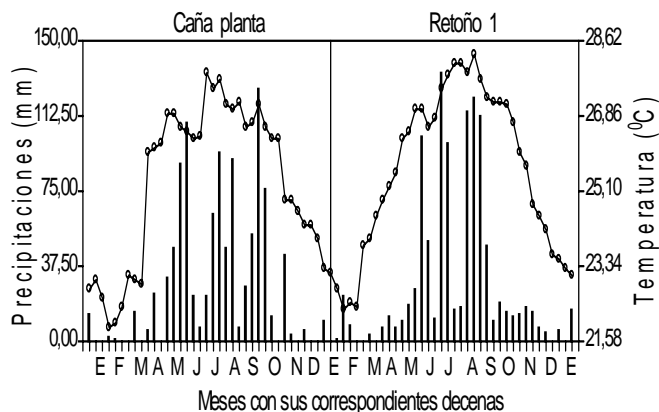
*Evapotranspiración.* La evapotranspiración real (ET<sub>r</sub>) en mm.d<sup>-1</sup> se calculó mensualmente para la caña planta y el primer retoño, mediante el método del evaporímetro clase A con el coeficiente bioclimático. Mientras que para la descomposición de sus componentes en transpiración (T<sub>p</sub>) y evaporación (E<sub>vp</sub>) se realizó a través del índice de área foliar (8) del genotipo C86-12 en ambas condiciones de humedad del suelo.

Además de la representación gráfica de la temperatura y las precipitaciones, del IAF y de la evapotranspiración y sus componentes, se empleó la prueba t de *student* para detectar diferencias estadísticas en los niveles de humedad del suelo y en el índice de área foliar en ambas condiciones de humedad del suelo. Se empleó además el Análisis de Coordenadas Principales, como forma de escalamiento multidimensional métrico, para conocer las similitudes o distancias entre las seis variedades en relación con los parámetros foliares evaluados en conjunto (índice de área foliar, largo y ancho del limbo, cantidad de hojas activas y transpiración) a los 10 meses, cuando concluyó el sobrehumedecimiento, mostrándose de mane-

ra gráfica y unidas a través de un árbol de recorrido mínimo (9). Dada la naturaleza de las variables, la distancia empleada fue la de Manhattan promedio, previa estandarización de los datos. Para el procesamiento automatizado de los datos, se empleó el paquete estadístico SAS (10).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

*Temperatura promedio del aire, las precipitaciones y humedad del suelo.* Para las precipitaciones, se demostró que en ambos ciclos de cosecha los totales anuales se mantuvieron entre 1 000 y 1 100 mm, la lluvia máxima caída en una decena osciló entre 120 y 140 mm, con valores promedio comprendidos entre 20 y 30 mm. La mayor diferencia se encontró en la distribución de las precipitaciones, donde para la caña planta las decenas con mayores lluvias aparecen en la primera de junio y tercera de septiembre, mientras que los mayores volúmenes de lluvia en el primer retoño se concentraron en la primera decena de julio y tercera de agosto. Relacionando temperatura con precipitaciones en magnitud, de acuerdo al índice de aridez de Gaussen y Bagnouls (7), el período comprendido de mayo a octubre se considera húmedo y seco el correspondiente de noviembre a abril (Figura 1), aunque para el período húmedo, existen decenas en que esto no se cumple, ya que en magnitud el doble de la temperatura media decenal sobrepasa a la lluvia caída en esa decena.



**Figura 1. Comportamiento decenal de las precipitaciones (barras) y la temperatura media del aire (curva), basado en el Índice de Gaussen y Bagnouls, correspondiente al ciclo vegetativo de caña planta y el primer retoño**

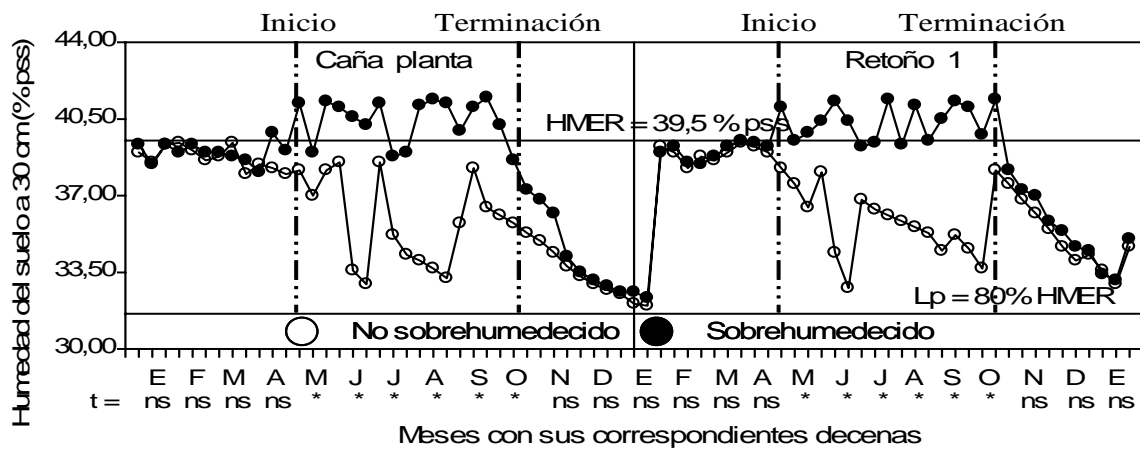
La dinámica en las variaciones de los niveles de humedad del suelo en los dos ciclos y las condiciones de humedad del suelo (Figura 2), señala cómo a intervalos la humedad en condiciones de sobrehumedecimiento sobrepasó la humedad máxima de equilibrio relativo (HMER), coincidiendo el período de sobrehumedecimiento comprendido de mayo a octubre con el considerado húmedo por el índice de aridez de Gaussen y Bagnouls (7), manteniendo al suelo con baja capacidad de aireación,

mientras que para el control se mantuvo por debajo o en límites muy cercanos a la HMER, con diferencias estadísticas respecto al control entre mayo y octubre. En ambas condiciones de humedecimiento del suelo y en todo el ciclo de los experimentos, la humedad del suelo no descendió del 80 % de la HMER o límite productivo. El rango de humedad óptimo del suelo, para no provocar afectaciones a las plantas tanto por exceso como por defecto, debe encontrarse entre la humedad máxima de equilibrio relativo y el límite productivo.

La capacidad de retención de humedad de un suelo es una de las principales propiedades físicas, por su implicación en la disponibilidad de agua para las plantas (11). Uno de los indicadores fundamentales que se han utilizado desde hace mucho tiempo para medir la retención del agua en el suelo es el conocido como capacidad de campo, cuya definición fue dada por Veihmeyer y Hendrickson (12), como la cantidad de agua que queda en el suelo después de que un exceso de agua ha drenado y de que ha disminuido de forma importante el movimiento en profundidad, lo cual tiene lugar entre dos y tres días después de una lluvia o del riego en un suelo con textura y estructura uniforme.

En los Vertisols esa definición no se cumple, debido a que estos suelos tienen muy baja permeabilidad y el equilibrio que ejerce la gravedad sobre el agua y la que ejerce el suelo tarda mucho en establecerse (13). Basado en lo anterior, se planteó la inaplicabilidad del concepto tradicional de capacidad de campo, a partir de que el valor de capacidad de campo determinado por los métodos tradicionales en los suelos con arcillas dilatables, se sobreestima la cantidad de agua disponible, lo que representa una cantidad considerable de agua, la cual lejos de ser beneficiosa trae como consecuencia, además de las pérdidas de agua, una relación agua-aire poco favorable para el desarrollo del cultivo o sobrehumedecimiento del suelo. Sobre esta base, se desarrolló el concepto de humedad máxima de equilibrio relativo (HMER), como nuevo elemento para caracterizar la retención de agua en los Vertisols (14).

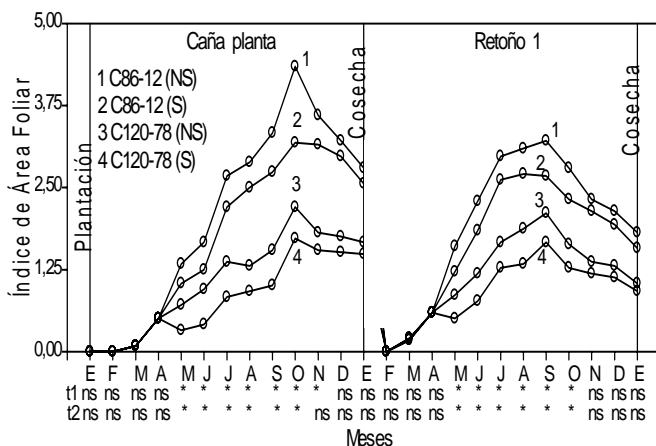
Lo explicado anteriormente sirve como elemento descriptivo para caracterizar, desde el punto de vista climático, el comportamiento de los años, correspondiente al período en el cual se desarrollaron los experimentos y el manejo de la humedad del suelo. Su valor se acrecienta si se asocia a indicadores fisiológicos del crecimiento y desarrollo de la caña de azúcar, como el índice de área foliar y a variables agroclimáticas como la evapotranspiración. *Dinámica del índice de área foliar.* El índice de área foliar es una variable del análisis del crecimiento que suministra información importante de la capacidad productiva real de una comunidad de plantas (15); por otro lado, se ha demostrado que este tipo de estudio fisiológico del proceso de crecimiento y desarrollo constituye una etapa indispensable en los programas de mejoramiento genético de la caña de azúcar (16). Es por estas razones, que a partir del 2002 se incluyó en el programa de mejora cañero cubano. Se le concede importancia especial a su dinámica, al constituir un indicador de la cobertura que realiza la superficie foliar de la planta del área cultivada (17).



\*indica diferencias significativas para  $p < 0.05$ , empleando  $t$  de *student*, que compara mensualmente los valores de humedad del suelo en ambas condiciones de humedecimiento

**Figura 2. Dinámica de la humedad del suelo en ciclos de caña planta y primer retoño, en condiciones de suelo no sobrehumedecido y sobrehumedecido, se destaca el período de inicio y terminación del sobrehumedecimiento**

En relación con la dinámica del índice de área foliar de los genotipos C86-12 y C120-78, a partir de abril y hasta octubre en que se enmarca el período de sobrehumedecimiento del suelo (Figura 3), existió diferencia significativa, debido a que el exceso de agua en el suelo redujo de manera significativa esta variable en ambos genotipos, si se compara con la dinámica en ausencia de sobresaturación de agua en el suelo, lo que denota la influencia negativa que ejercen elevados niveles de humedad en suelos con alta retención de agua, debido a las limitaciones con el oxígeno del suelo, empleado en la respiración mitocondrial, que provoca un descenso marcado en el estado energético de las células con implicaciones directas en los procesos fotosintéticos (18).



\*,\*\* y \*\*\* indican diferencias significativas para  $p < 0.05$ , 0.01 y 0.001 respectivamente, empleando  $t$  de *student*, ( $t_1$ ) resultados de la  $t$  de *student* que compara el genotipo C86-12 en ambas condiciones de humedad del suelo mensualmente y  $t_2$  para la variedad C120-78

**Figura 3. Dinámica del Índice de Área Foliar de los genotipos C86-12 y C120-78 en condiciones sobrehumedecidas (S) y no sobrehumedecidas (NS), en ciclos de caña planta y primer retoño**

Desde noviembre hasta la cosecha en enero, esta diferencia se minimiza y no es significativa, debido a que la planta una vez que en el suelo ha cesado la condición estresante vuelve a restablecer sus funciones fisiológicas, aunque nunca llega a igualar los valores de IAF.

La dinámica del IAF en ausencia de sobrehumedecimiento en caña planta, estableció los máximos valores en octubre, a los nueve meses después de la plantación, mientras que en el primer retoño se alcanzó un mes antes. Este comportamiento se debe a que para la caña planta, el establecimiento inicial fue más lento, al compararse con el primer retoño, debido a que el ahijamiento en las cañas plantas es progresivo en el tiempo, culminando alrededor de los 120 días, mientras que el rebrote de los retoños es casi uniforme (6), lo que los hace establecer valores de IAF relativamente altos a edades más tempranas que la caña planta. Esto se revierte una vez que la plantación ha alcanzado su pleno desarrollo. Por genotipos la dinámica de la variedad C86-12 fue superior a la C120-78 en todos los meses.

Al relacionar esta dinámica con la de la humedad del suelo, descrita anteriormente, se pudo constatar que para ambos ciclos de cosecha, las magnitudes más elevadas de este índice correspondieron en grado considerable con los meses de mayores niveles de humedad en el suelo y viceversa en condiciones de no sobresaturación de agua en el suelo.

Atendiendo a las investigaciones más actuales, todo parece indicar que en los suelos proclives al encharcamiento, la atención se está centrando en el estudio de las variaciones de los niveles de humedad del suelo, que separando los ingresos por lluvia y riego, se encuentra influenciado por fenómenos de capilaridad (19) y de las aguas subterráneas, dada su influencia en el sistema radical de las plantas y en la respuesta agroproductiva (20, 21, 22, 23, 24, 25).

Estos autores concluyeron que fluctuaciones en la humedad del suelo pueden deberse en grado considerable a elevaciones de las aguas subterráneas, y que ascensos prolongados cercanos a los 30 cm, comienzan a afectar el normal desarrollo de la caña de azúcar. Este fenómeno negativo se acrecienta si se hace un manejo inadecuado del agua de riego (26). Los estudios de la dinámica de la humedad del suelo se incrementan para la caña de azúcar, ya que su disponibilidad es la mayor limitante para su crecimiento y desarrollo (27, 28).

En Brasil y Sri Lanka las variaciones encontradas en el IAF para la caña de azúcar son atribuidas a diferencias genéticas y a las condiciones de manejo del cultivo, donde la humedad presente en el suelo tiene un peso importante (29).

Para las condiciones cubanas, una de las investigaciones más completas fue la realizada por Torres y Álvarez (17), al abordar el comportamiento del IAF de varios genotipos de caña de azúcar en un suelo Ferralítico Rojo, en varios ciclos de cosecha y con diferentes tratamientos. Respecto a los ciclos de cosecha, el establecimiento inicial de este índice resultó más lento en plantaciones de caña planta y más rápido en primer retoño. Por otro lado, las densidades de plantación y fuentes orgánicas de nutrición provocaron diferencias en el índice de las variedades empleadas, lo que corrobora las diferencias que introducen los genotipos y el manejo de la plantación.

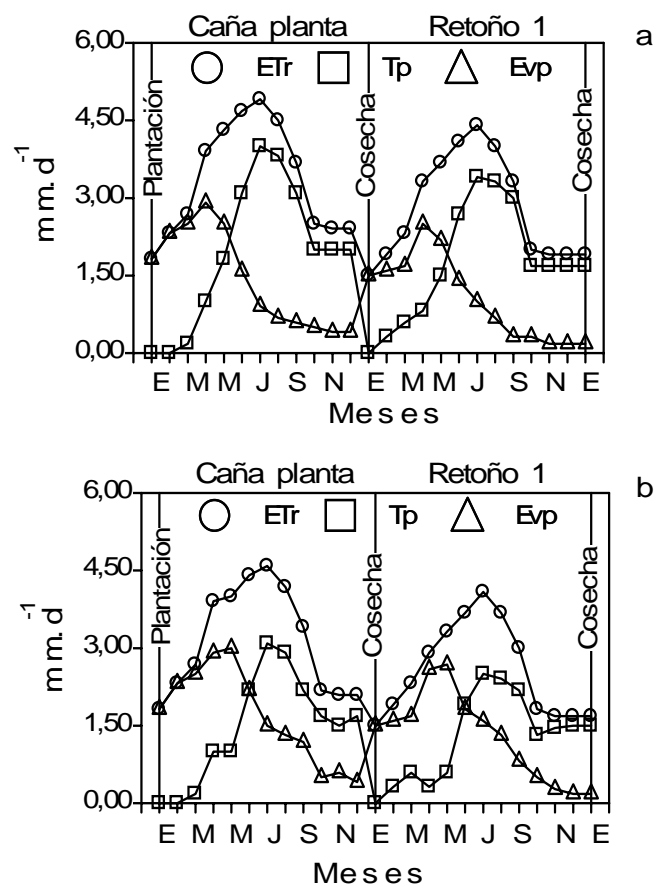
En magnitudes similares de IAF, se coincidió en esta investigación con otros logros (16), al estudiar los aspectos fisiológicos y azucareros en relación con la dinámica del crecimiento y desarrollo de cuatro variedades cañeras, pero en un suelo Ferralítico Rojo, donde se incluyó coincidentemente la variedad C1051-73.

Las variaciones de la tendencia en las dinámicas del IAF fueron muy similares en caña planta y el primer retoño, siendo indicativo de ser característico de la especie, su diferencia estriba en las magnitudes diferentes que se alcanzaron entre ciclos de cosecha y variedades, marcado por el diferente grado de sobresaturación de agua o no del suelo. Estas dinámicas al relacionarse con las de la temperatura media del aire y la distribución de las precipitaciones para el período, se pudo establecer que los mayores valores de estos parámetros en ambos ciclos de cosecha, correspondieron al período de las temperaturas medias más altas del aire y con los niveles pluviométricos mayores, lo que creó condiciones propicias para la ocurrencia del gran período de crecimiento (6); mientras que en el intervalo de tiempo que correspondió a los meses más fríos y menos lluviosos, estos indicadores tendieron a permanecer constantes o a disminuir, tendencia también observada anteriormente (17).

Aunque esta investigación demostró cómo el exceso de agua en el suelo reduce el área fotosintéticamente activa con repercusiones directas en la actividad fotosintética, continúa vigente la controversia sobre la causa de la disminución de la actividad fotosintética en respuesta al estrés hídrico (30), lo que se debe principal-

mente a limitaciones en la difusión del  $\text{CO}_2$ , como consecuencia del cierre de los estomas y a la clorosis foliar (31), mientras que otros defienden la concepción de la inhibición del metabolismo ocasionado por el estrés (32, 33, 34, 35).

*Evapotranspiración y sus componentes.* La separación de los componentes de la evapotranspiración real (Figura 4a y b) puso de manifiesto en ambas condiciones de humedad del suelo, que durante la brotación de la caña planta y el rebrote en el primer retoño, la Etr es debida en mayor medida a la evaporación del agua desde la superficie del suelo. A medida que se incrementa el índice de área foliar, aumentan el consumo de agua por la planta y la evapotranspiración, lo que favoreció el gran período de crecimiento. Una vez que la planta completa su desarrollo foliar, la mayor cantidad del agua evapotranspirada es empleada por la planta en la transpiración.



**Figura 4. Dinámica de la evapotranspiración real (ETr) y la partición de sus componentes, transpiración (Tp) y evaporación (Evp), a partir del índice de área foliar de la variedad C86-12 en caña planta y primer retoño para condiciones no sobrehumedecidas (a) y en excesos de agua en el suelo (b)**

En condiciones sobrehumedecidas (Figura 4b) esta tendencia se repite, con la particularidad que el exceso de agua en el suelo hizo descender la evapotranspiración, debido a la declinación de la transpiración por la reduc-

ción del índice de área foliar y el cierre de los estomas que induce este tipo de estrés (36), pero incrementó el agua que se evapora desde la superficie del suelo.

Los valores de evapotranspiración real más elevados coincidieron con los meses de temperaturas más altas y niveles de precipitaciones mayores, debido a que la lluvia es un elemento climático que influye directamente en el balance de humedad del suelo, mientras que la temperatura lo realiza de forma indirecta a través de la evapotranspiración. Dentro del período húmedo, los mayores descensos en los niveles de la humedad del suelo se produjeron cuando la pérdida de humedad del suelo por Etr fue mayor, mientras que para el período de escasas precipitaciones en determinados intervalos se establece un balance negativo entre la lluvia y la evapotranspiración real, lo cual es una característica para esta zona (13).

Lograr separar de la ETr la evaporación y la transpiración es de gran importancia, si se pretende esclarecer los efectos del empleo del agua en el crecimiento, desarrollo y la producción de la caña de azúcar, por su relación estrecha con el consumo de agua por la planta.

Como el IAF ejerce una función importante como regulador de la cantidad de radiación solar que llega a la parte basal de un plantón de caña de azúcar, ya que es el primer responsable de la intercepción de esta radiación, esto implica que genotipos con un desarrollo rápido y mayores IAF, como es el caso de la variedad C86-12, determinan una mayor cubierta vegetativa en el suelo, lo que incrementa la producción de biomasa por aumento del área fotosintéticamente activa y a su vez hace descender la pérdida de agua por evaporación. Por otro lado, genotipos con lento y escaso desarrollo de su IAF producen altas pérdidas por evaporación desde la superficie del suelo, ocasionando acumulación de sales en su superficie, causado por la baja velocidad de infiltración del agua a través del perfil. Al estimar el área foliar en varie-

dades de caña de azúcar, se determinó que la transpiración de una planta era proporcional a su área foliar (37).

Estudios recientes han demostrado que la biomasa de la caña de azúcar puede ser incrementada maximizando la intercepción de la radiación solar por aumento del área foliar, con el manejo de genotipos y condiciones de cultivo (38), como la evapotranspiración (39, 40), dada la influencia creciente de la fisiología en las prácticas agrícolas internacionales (41).

Respecto al Análisis de Coordenadas Principales, la variabilidad explicada por ambas coordenadas fue alta en ambos casos (Figura 5), pero menor en condiciones de sobrehumedecimiento (80.1 %) en relación con el 89.7 % en ausencia de este estrés. El árbol de recorrido mínimo (ARM) mostró que en condiciones de no sobrehumedecimiento, son muy similares el IAF, largo y ancho del limbo, la cantidad de hojas activas y transpiración de las variedades C120-78 y C1051-73 y esta última en relación con la C87-51. A su vez, los parámetros foliares de la C87-51 poseen similitudes con los genotipos C86-456 y C90-469. Los rasgos foliares más comunes se encontraron entre C86-456 y C86-12.

Sin embargo, el estrés por anaerobiosis del suelo modificó la respuesta de los seis genotipos. Se observó, contrariamente a lo ocurrido en condiciones sin exceso de agua en el suelo, que en condiciones anaeróbicas la variedad C90-469 posee un alto grado de similitud con C1051-73, C86-12, C120-78 y C86-456; pero estas condiciones la distanciaron más de la variedad C87-51, lo que demostró cómo el sobrehumedecimiento del suelo modifica el comportamiento foliar de la caña de azúcar. La simplificación de las interrelaciones entre variedades para los parámetros foliares logradas con el uso del ARM, quedó evidenciada como una ventaja del método, empleado también con éxito en *Arabidopsis* (42), para el agrupamiento de datos de expresión genética.

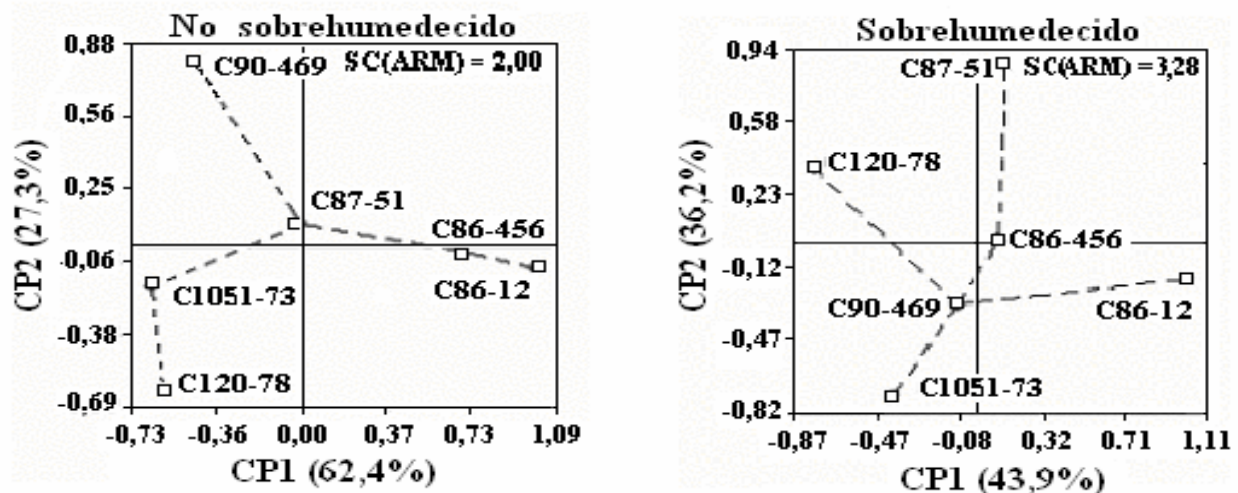


Figura 5. Árbol de recorrido mínimo (ARM) y proyección de las variedades en el espacio multivariado en relación con los parámetros foliares en las dos primeras coordenadas principales, considerando la caña planta y el primer retoño en conjunto, en los dos experimentos con condiciones de humedad del suelo diferentes, a la edad de 10 meses, una vez concluido el sobrehumedecimiento

## REFERENCIAS

1. Magalhães, P. C. /et al./ Adaptación del maíz a condiciones de estrés por encharcamiento. *Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (CORPOICA)*, 2000, vol. 2, p. 8.
2. Razi, S. e Ibrahím, I. Towards sustainable management of environmental stress for crop production in the tropics. *Food, Agriculture & Environment*, 2003, vol. 3, no. 4, p. 300-303.
3. García, H. P. Optimización del proceso de selección de variedades de caña de azúcar tolerantes al estrés por sequía y mal drenaje en la zona central de Cuba. Cienfuegos. [Tesis de Doctorado]; Instituto Nacional de Investigaciones de la Caña de Azúcar. 2004. 92 p.
4. Cuba. Minagri. Instituto de Suelos. Nueva versión de la clasificación genética de los suelos de Cuba. La Habana: Agrinfor, 1999, 64 p.
5. Instituto Nacional de Investigaciones de la Caña de Azúcar. Normas y Procedimientos del Programa de Mejoramiento Genético de la Caña de Azúcar en Cuba. *Cuba & Caña*, 2002, no. 1, p. 315.
6. Van Dillewijn, C. Botánica de la caña de azúcar. La Habana: Instituto Cubano del Libro, 1951. 460 p.
7. Gaussen, H. y Bagnouls, F. Saison seche et indice xerothermique. Faculté des Sciences. Tolouse: Université de Tolouse. 1953. s/p.
8. Mailhol, J. C. /et al./ Sorghum and sunflower evapotranspiration and yield from simulated leaf area index. *Agricultural Water Management*, 1977, vol. 35, no. 1-2, p. 167-182.
9. Gower, J. C. y Ross, P. G. N. Minimum spanning trees and single cluster analysis. *Applied Statistics*, 1969, vol. 18, p. 54-64.
10. SAS Institute. Statistical Analysis System. SAS Institute. User's Guide. Version 8.0. SAS Institute, Inc., Cary, North Carolina, USA, 2000. 3884 p.
11. Bonilla, C. A. /et al./ Distribución espacial y temporal de la precipitación y humedad del suelo en tres sitios forestales de la VIII Región de Chile. *Agricultura Técnica*, 2002, vol. 64, no. 2, p. 541-554.
12. Veihmeyer, F. J. y Hendrickson, A. N. Soil moisture in relation to plant growth. *Ann. Rev. Plant Physiol.* 1950, vol. 1, p. 285-304.
13. Cid, L. B. Efectos de los fenómenos de contracción-dilatación sobre las transferencias de agua y aire en suelos con arcillas dilatables. [Tesis de Doctorado]; IIRD, 1992. 116 p.
14. Ortiz, C. G. y Rivero, L. R. Retención de la humedad de los Vertisols a partir de un nuevo concepto. Importancia para el riego y drenaje. En: Conferencia Científica de Ingeniería Agrícola de La Habana. AGRING 2006 (2:2006:La Habana).
15. Kuet, J. /et al./ Methods of growth analysis. En: Plant Photosynthesis Production. Manual of Methods. La Habana, 1971. 391 p.
16. Blanco, M. de los Á. /et al./ Dinámica del crecimiento y desarrollo de cuatro variedades de caña de azúcar (*Saccharum sp.*): Aspectos fisiológicos y azucareros. *Cultivos Tropicales*, 2003, vol. 24, no.1, p. 47-54.
17. Torres, W. y Álvarez F. Comportamiento del índice de área foliar de caña de azúcar (*Saccharum sp.*) en varias cepas y bajo diferentes tratamientos. *Cultivos Tropicales*, 1991, vol. 12, no. 3, p. 38-43.
18. Geigenberger, P. Response of plant metabolism to too little oxygen. *Curr. Opin. Plant Biol.*, 2003, vol. 6, p. 247-256.
19. Watanabe, K. /et al./ Changes in seasonal evapotranspiration, soil water content, and crop coefficients in sugarcane, cassava, and maize fields in Northeast Thailand. *Agricultural Water Management*, 2004, vol. 67, no 2, p.133-143.
20. Kornecki, T. S. /et al./ Drainage research to improve runoff water quality and soil trafficability. *Land and Water*, 2001, vol. 4, no. 3, p. 960-967.
21. Glaz, B. /et al./ Sugarcane cultivar response to high summer water tables in the Everglades. *Agronomy Journal*, 2002, no. 94, p. 624-629.
22. Glaz, B. /et al./ Period flooding and water table effects on two sugarcane genotypes. *Agronomy Journal*, 2004, no. 96, p. 832-838.
23. Glaz, B. S. /et al./ Water table and sugar cane: A review of recent research. *Sugar Journal*, 2004, vol. 67, no. 1, p. 16.
24. Morris, D. R. y Tai, Y. P. Water table effects on sugarcane root and shoot development. *American Society of Sugar Cane Technologists*, 2004, no. 24, p. 41-59.
25. Glaz, B. y Gilbert, R. Sugarcane response to water table, period flood, and foliar nitrogen on organic soil. *Journal American Society Sugar Cane Technologists*, 2005, vol. 25, p. 31-39.
26. Cuellar, I. A. /et al./ Factores edáficos limitativos En: Caña de Azúcar. Paradigma de Sostenibilidad. La Habana: Ediciones PUBLINICA. 2003, p. 18-19.
27. Hurst, C. /et al./ Sugarcane water use from shallow water tables: implications for improving irrigation water use efficiency. *Agricultural Water Management*, 2004, vol. 65, no. 1, p. 1-19.
28. Inman-Bamber, N. G. y Smith, D. M. Water relations in sugarcane and response to water deficits. *Field Crops Research*, 2005, vol. 92, no. 2-3, p.185-2002.
29. Cândido, A. X. y Vettorazzi, C. A. Leaf area index of ground cobres in a subtropical watershed. *Sci. Agric.*, 2003, vol. 60, no. 3, p. 425-431.
30. Lawlor, D. W. y Cornic, G. Photosynthetic carbon assimilation and associated metabolism in relation to water deficits in higher plants. *Plant Cell Environ*, 2002, vol. 25, p. 275-294.
31. Carvalho, C. J. R. de e Ishida, F. Y. Responses of young pijuayo plants (*Bactris gasipaes* Kunth) to flooding. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 2002, vol. 37, no. 9, p. 1231-1237.
32. Parry, M. A. J. /et al./ Rubisco activity: effects of drought stress. *Annals of Botany*, 2002, vol. 89, p. 833-839.
33. Bota, J. /et al./ Is photosynthesis limited by decreased Rubisco activity and RuBP content under progressive water stress? *The New Phytologist*, 2004, vol. 162, p. 671-681.
34. Flexas, J. Effects of drought on photosynthesis in grapevines under field conditions: an evaluation of stomatal and mesophyll limitations. *Functional Plant Biology*, 2002, vol. 29, p. 461-471.
35. Flexas, J. /et al./ Understanding down-regulation of photosynthesis under water stress: future prospects and searching for physiological tools for irrigation management. *Annals of Applied Biology*, 2004, vol. 144, p. 273-283.
36. Jackson, M. B. /et al./ Ionic and pH signalling from roots to shoots of flooded tomato plants in relation to stomatal closure. *Plant and Soil*, 2003, no. 253, p.103-113.

37. Chabot, R. /et al./ Evaluation of the sap flow determined with a heat balance method to measure the transpiration of a sugarcane canopy. *Agricultural Water Management*, 2005, vol. 75, no 1, p. 10-24.
38. Singels, A. /et al./ The effect of crop start date, crop class and cultivar on sugarcane canopy development and radiation interception. *Field Crops Research*, 2005, vol. 92, no. 2-3, p. 248-260.
39. Inman-Bamber, N. G. Crop coefficients and water-use estimates for sugarcane based on long-term Bowen ratio energy balance measurements. *Field Crops Research*, 2003, vol. 83, no. 2, p. 125-138.
40. Wiedenfeld, B. Scheduling water application on drip irrigated sugarcane. *Agricultural Water Management*, 2004, vol. 64, no. 2, p.169-181.
41. Lisson, S. N. /et al./ The historical and future contribution of crop physiology and modelling research to sugarcane production systems. *Fields Crops Research*, 2005, vol. 92, no. 2-3, p. 321-335.
42. Xu, Y. /et al./ Minimum spanning trees for gene expression data clustering. *Genome Informatic*, 2001, vol. 12, p. 24-33.

Recibido: 24 de enero de 2007

Aceptado: 28 de noviembre de 2007