

COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS TABASCO

PROGRAMA PRODUCCIÓN AGROALIMENTARIA EN EL TRÓPICO

**CONSUMO DE NITRÓGENO POR VARIEDADES DE CAÑA DE AZÚCAR EN EL
INGENIO AZSUREMEX DE TENOSIQUE, TABASCO**

JOSÉ IZQUIERDO HERNÁNDEZ

T E S I S

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL

PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS

H. CÁRDENAS, TABASCO, MÉXICO

2015

La presente tesis, titulada: **Consumo de nitrógeno por variedades de caña de azúcar en el Ingenio Azsuremex de Tenosique, Tabasco**, realizada por el alumno **José Izquierdo Hernández**, bajo la dirección del consejo particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS

EN PRODUCCIÓN AGROALIMENTARIA EN EL TRÓPICO

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO: 

DR. SERGIO SALGADO GARCÍA

ASESOR: 

DR. DAVID JESÚS PALMA LÓPEZ

ASESORA: 

DRA. LUZ DEL CARMEN LAGUNES ESPINOZA

ASESOR: 

DR. HIPÓLITO ORTIZ LAUREL

ASESOR: 

DR. SAMUEL CÓRDOVA SÁNCHEZ

H. CÁRDENAS, TABASCO, MÉXICO, 28 DE AGOSTO DE 2015

CONSUMO DE NITRÓGENO POR VARIEDADES DE CAÑA DE AZÚCAR EN EL INGENIO AZSUREMEX DE TENOSIQUE, TABASCO

José Izquierdo Hernández, M.C.
Colegio de Postgraduados, 2015

RESUMEN

En los últimos años, el uso racional del nitrógeno como fertilizante para el cultivo de caña de azúcar, ha demandado la atención de los especialistas en fertilidad de suelos y en economía, dada la necesidad creciente de conservar el ambiente y al incremento del precio de los fertilizantes. Uno de los requisitos primordiales para mejorar las dosis de fertilización nitrogenada para el cultivo de caña de azúcar en Tabasco es conocer la variación en el requerimiento de este elemento entre diferentes variedades. El presente trabajo tuvo por objetivo, evaluar el efecto de la fertilización nitrogenada sobre parámetros fisiológicos, el contenido nutrimental, el rendimiento y el consumo de nitrógeno de diferentes variedades de caña de azúcar en el Ingenio Azsuremex (IA). El trabajo se realizó en el área de abastecimiento del IA de Tenosique, Tabasco, durante el ciclo plantilla 2014/2015, bajo condiciones de temporal en un suelo Cambisol Háplico (Límico-Éutrico-Calcárico). El diseño experimental fue un arreglo en parcelas divididas con bloques completos al azar, donde las parcelas grandes fueron las dosis de nitrógeno (0, 120 y 180 kg ha⁻¹) y las parcelas chicas fueron las variedades de caña de azúcar (COLPOSCTMEX 06-039, COLPOSCTMEX 06-271, COLPOSCTMEX 06-474, COLPOSCTMEX 06-2362, COLPOSCTMEX 05-223, ATEMEX 96-40, RD 75-11, MEX 69-290, MEX 68-P23 y CP 72-1210). Los resultados obtenidos indican diferencias significativas en la concentración foliar de N en las variedades evaluadas, y no significativa con respecto a la dosis de N aplicadas y su interacción NxV. No se encontró respuesta significativa en la concentración foliar de P y K y contenido de clorofila total. La concentración foliar de N y P fue adecuada no así K que fue deficiente, lo que sugiere revisar la dosis de K recomendada para el suelo Cambisol Háplico (Límico-Éutrico-Calcárico) del IA. La variedad ATEMEX 96-40 presentó la tasa fotosintética, conductancia estomática y tasa de transpiración más altas, seguida de la COLPOSCTMEX 05-223 y RD 75-11; mientras que la MEX 69-290 y MEX 68-P23 fueron las que obtuvieron el valor más bajo para dichas variables. La dosis de 180 kg ha⁻¹ N afectó negativamente la calidad de jugo de las variedades COLPOSCTMEX 06-271 y CP 72-1210. El rendimiento de caña presentó una respuesta lineal positiva con respecto al incremento en la aplicación de N. El consumo de N fue diferente entre variedades y aumentó conforme se aumentó la dosis de N. MEX 68-P23 fue la variedad con el mayor consumo de N; mientras que MEX 69-290 y COLPOSCTMEX 06-271 presentaron el menor consumo de N. El índice de consumo interno de nitrógeno varió de 1.5 a 2.4 kg de N t de tallo⁻¹ en las 10 variedades. La tasa de retorno al capital variable fue diferente entre variedades y dosis de N. Se concluye que el rendimiento de caña fue afectado positivamente por la aplicación de N. El consumo de nitrógeno es diferente entre variedades.

Palabras clave: caña de azúcar, uso de nitrógeno, rendimiento, parámetros fisiológicos.

CONSUMPTION OF NITROGEN BY VARIETY OF SUGAR IN THE SUGAR MILL AZSUREMEX TENOSIQUE, TABASCO

José Izquierdo Hernández, M.C.

Colegio de Postgraduados, 2015

ABSTRACT

In recent years, the rational use of nitrogen as fertilizer for growing sugarcane, has demanded the attention of specialists in soil fertility and economy, given the growing need to conserve the environment and to increase the price of fertilizers. One of the primary requirements for improving rates of nitrogen for growing sugarcane in Tabasco fertilization is to know the variation in the requirement of this element between different varieties. The objective of this work was to evaluate the effect of nitrogen fertilization on physiological parameters, the nutritional content, the yield and nitrogen consumption of different varieties of sugarcane in the Sugar Mill Azsuremex (IA). The study was conducted in the area of supply of Sugar Mill Azsuremex (IA) of Tenosique, Tabasco, during the 2014/2015 plant cycle, under rainfed conditions in soil Cambisol Háplico (Siltic-Éutrico-Calcaric). The experimental design was arranged in split plots with complete randomized block, where the main plots were the nitrogen rates (0, 120 and 180 kg ha⁻¹) and the subplots were the varieties of sugarcane (COLPOSCTMEX 06-039, COLPOSCTMEX 06-271, COLPOSCTMEX 06-474, COLPOSCTMEX 06-2362, COLPOSCTMEX 05-223, ATEMEX 96-40, RD 75-11, MEX 69-290, MEX 68-P23 y CP 72-1210). The results indicate significant differences in leaf N concentration in the varieties tested, and not significant with respect to the dose of N applied and their interaction NxV. No significant response was found in leaf concentration of P and K and chlorophyll content. No correlation was observed between leaf N concentration and the total chlorophyll. The foliar concentration of N and P was not adequately K was deficient, suggesting K check recommended dose for the soil Cambisol Háplico (Siltic-Eutric-Calcaric) of the IA. The ATEMEX 96-40 variety presented the photosynthetic rate, stomatal conductance and transpiration rate highest, followed COLPOSCTMEX 05-223 and RD 75-11; while the MEX 69-290 and MEX 68-P23 were those which had the lowest value for these variables. The dose of 180 kg N ha⁻¹ negatively affected the quality of juice varieties COLPOSCTMEX 06-271 and CP 72-1210. The cane yield showed a positive linear response with respect to the increase in the application of N. N consumption differed among varieties and increased as the dose was increased N. MEX 68-P23 was the variety with the highest consumption of N; while COLPOSCTMEX 06-271 and MEX 69-290 had the least amount of N. The internal rate of nitrogen consumption ranged from 1.5 to 2.4 kg N t stem⁻¹ in 10 varieties. The rate of return to variable capital differed between varieties and doses of N. We conclude that the cane yield was positively affected by the application of N. Nitrogen consumption is different between varieties.

Keywords: sugarcane, nitrogen use, yield, physiological parameters.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco infinitamente a nuestro padre **Dios** por su misericordia, por darme una familia, vida, salud y entendimiento para poder alcanzar esta nueva meta en mi vida.

Al Colegio de Postgraduados, Campus Tabasco, por haberme otorgado la inmejorable oportunidad de realizar mis estudios de postgrado en sus instalaciones, esperando no haberlo defraudado.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) y a todas las personas que pagan impuestos, por haber hecho posible el apoyo económico otorgado durante la realización de mi maestría.

A mi profesor consejero: Dr. Sergio Salgado García, por la dirección y asesoría brindada para la realización de este trabajo, por sus enseñanzas, consejos y acertadas críticas, sugerencias y observaciones, sobre todo por su confianza y amistad.

Al Dr. Samuel Córdova Sánchez, por su apoyo incondicional durante la realización del experimento de campo, por sus enseñanzas y amistad brindada.

A la Dra. Luz del Carmen Lagunes Espinoza, Dr. Sergio Salgado García Dr. Samuel Córdova Sánchez, Dr. Mepivoseth Castelán Estrada por su apoyo durante las mediciones de los parámetros fisiológicos de las variedades de caña de azúcar.

A mis asesores: Dr. David Jesús Palma López, Dra. Luz del Carmen Lagunes Espinoza, Dr. Hipólito Ortiz Laurel y Dr. Samuel Córdova Sánchez, por su apoyo brindado durante cada etapa del presente trabajo, por sus acertadas observaciones y sugerencias que hacen posible la mejora en la calidad de la presentación de este trabajo, pero sobre todo por el conocimiento transmitido, la confianza y amistad que me han brindado.

Al Grupo MASCAÑA-LPI:AEES, a la Fundación Produce Tabasco, A.C., por el financiamiento del proyecto Validación de variedades de caña de azúcar en campo en ciclo plantilla en la zona de Los Ríos, Tabasco, dentro del cual tuvo lugar la realización del experimento de campo; a la Asociación Local de productores de caña de azúcar CNPR del Ingenio Azsuremex.

Al Laboratorio Suelos, Plantas y Aguas (LASPA) del Colegio de postgraduados Campus Tabasco, Dr. Armando Guerrero Peña y técnicos: Bernardo Gómez, Martha y Esteban, por las facilidades y apoyo brindado durante las determinaciones analíticas realizadas.

Al Ing. José Orlando Espinoza por su valioso apoyo durante la realización del experimento de campo y por su amistad brindada y los gratos momentos y experiencias vividos.

A la Ing. Nalda Juventina Rodríguez Valencia por su apoyo durante la realización de la fase de campo de este trabajo, por su amistad y por ser ejemplo de superación personal a pesar de las adversidades que a veces nos pone la vida.

Al Laboratorio de campo del Ingenio Presidente Benito Juárez por su apoyo en la determinación de los parámetros de calidad de jugo de las muestras de caña de azúcar.

Al laboratorio de campo del Ingenio Azsuremex por su valioso apoyo durante la cosecha del experimento de campo.

Al Sr. Gustavo Morales Barrada por su valioso apoyo y colaboración durante la realización del experimento de campo y por ser un productor realmente interesado en el cultivo de la caña de azúcar.

A todas aquellas personas que me brindaron su apoyo durante la realización de mis estudios de postgrado y que de manera involuntaria dejo de mencionar.

DEDICATORIAS

A mi abuelo y padre al mismo tiempo: Asunción Hernández Jiménez por haber cuidado desinteresadamente de mí desde siempre, por haberme inculcado el amor por la agricultura, por ser ejemplo de superación constante y por haberme enseñado que no hay mejor herencia que un padre le pueda dar a un hijo que sus estudios. Papá espero no haberlo defraudado.

A mi más que abuela, madre: Celia Gómez Góngora por todas aquellas noches de desvelo por cuidar de mí, por sus sabios consejos, pero sobre todo por su amor y cariño desinteresado.

A mi madre: Martha Hernández Gómez, por darme la vida.

A mi padre: José Manuel Izquierdo Ramos (†) quien seguramente estaría orgulloso de su hijo.

A mi esposa: María Jesús Sánchez García, por su amor, apoyo, comprensión, consejos y críticas brindadas no solamente durante mis estudios de maestría sino también en la etapa final de la licenciatura. Amor este logro es tuyo. Te amo.

A mi hijo: José María Izquierdo Sánchez (Chemita) por alegrarme la vida desde el momento que supe que te estabas formando en el vientre de tu madre y tu nacimiento ha sido la mayor satisfacción de mi vida. Por ser la esperanza de mi vida, por los momentos de amor y ternura que te he robado por dedicarme a la elaboración de este trabajo. Hijo todo es pensando en ti, te amo.

A mis maestros: Dr. Sergio Salgado García, Dr. David Jesús Palma López, Dra. Luz del Carmen Lagunes Espinoza, Dr. Lorenzo A. Aceves Navarro, Dr. Mepivoseh Castelán Estrada, Dr. Mario Manuel Osorio Arce, Dr. Armando Guerrero Peña, Dr. Antonio Macías, Dr. Enrique Ortíz Torres, Dr. José Rodolfo Hipólito Mendoza Hernández, Dr. Joel Zavala Cruz, Dr. Saúl Sánchez Soto, Dr. Carlos F. Ortiz García, Dr. Roberto de la Rosa Santamaría y Lic. Juanita Pereyra Susan por todas sus enseñanzas y consejos brindados durante esta etapa de mi formación profesional.

A la agroindustria de la caña de azúcar del estado de Tabasco, porque hacen posible el cultivo y la industrialización del azúcar. Esperando poder contribuir a mejorar el manejo agronómico de este cultivo en Tabasco.

CONTENIDO

RESUMEN	iii
ABSTRACT	iv
AGRADECIMIENTOS	v
DEDICATORIAS	vii
ÍNDICE DE CUADROS	xii
ÍNDICE DE FIGURAS	xv
I. INTRODUCCIÓN	1
II. OBJETIVOS E HIPÓTESIS	3
2.1. Objetivo general.....	3
2.2. Objetivos específicos.....	3
2.3. Hipótesis.....	4
III. REVISIÓN DE LITERATURA	5
3.1. El cultivo de la caña de azúcar.....	5
3.2. Requerimientos edafoclimáticos de la caña de azúcar.....	6
3.3. Requerimientos nutricionales.....	8
3.4. Experiencias sobre fertilización nitrogenada en el cultivo de caña de azúcar.....	10

3.4.1. Dosis de fertilizante nitrogenado	11
3.4.2. Épocas de aplicación del fertilizante	15
3.4.3. Fuentes de fertilizantes para el cultivo de caña de azúcar	16
3.4.4. Métodos de aplicación del fertilizante.....	17
3.5. Parámetros fisiológicos en caña de azúcar.....	19
3.5.1. Tasa fotosintética.....	21
3.5.2. Densidad y apertura estomática.....	25
3.5.3. Concentración interna de CO ₂	27
3.5.4. Contenido de clorofila	27
3.5.5. Unidades SPAD.....	28
3.5.6. Acumulación de sacarosa	29
3.6. Índice de área foliar.....	30
3.7. Tasa de crecimiento.....	31
IV. MATERIALES Y MÉTODOS.....	32
4.1. Ubicación y características del sitio experimental	32
4.2. Preparación del terreno.....	32
4.3. Manejo agronómico.....	32
4.4. Diseño experimental y tratamientos.....	33
4.5. Variables de estudio	34
4.5.1. Diagnóstico foliar	34

4.5.2. Determinación del contenido de clorofila en hojas de caña de azúcar	36
4.5.3. Parámetros fisiológicos.....	37
4.5.4. El rendimiento	38
4.5.5. La calidad del jugo	38
4.5.6. Consumo de nitrógeno.....	38
4.5.7. Análisis económico de la fertilización nitrogenada.....	39
4.6. Análisis estadístico.....	40
V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	41
5.1. Diagnóstico nutricional	41
5.1.1. Concentración de nitrógeno foliar	41
5.1.2. Contenido de fósforo foliar (%).....	43
5.1.3. Contenido de potasio foliar (%).....	43
5.2. Unidades SPAD.....	45
5.3. Contenido de clorofila total ($\mu\text{g g}^{-1}$ peso seco)	47
5.4. Parámetros fisiológicos del cultivo de la caña de azúcar	49
5.4.1. Tasa fotosintética ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$).....	49
5.4.2. Conductancia estomática ($\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	51
5.4.3. Concentración interna de CO_2 ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$).....	53
5.4.4. Tasa de transpiración ($\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$).....	54
5.4.5. Eficiencia instantánea en el uso del agua	56

5.5. Parámetros fisiológicos de tres variedades de caña de azúcar en respuesta a la radiación fotosintéticamente activa (PAR)	57
5.6. Seguimiento de madurez de variedades de caña de azúcar	60
5.7. Calidad de jugo de las variedades de caña de azúcar	64
5.8. Rendimiento ($t\ ha^{-1}$)	66
5.9. Rendimiento de materia seca.....	67
5.9.1. Rendimiento de materia seca en paja (RMSP)	67
5.9.2. Rendimiento de materia seca de tallos (RMST).....	69
5.9.3. Rendimiento de materia seca total de las variedades (RMSTo).....	70
5.10. Consumo de nitrógeno	73
5.10.1. Consumo de nitrógeno por la paja (CNP)	73
5.10.2. Consumo de nitrógeno por los tallos (CNT)	74
5.10.3. Consumo de nitrógeno total (CNTo).....	76
5.11. Índice de eficiencia interna de utilización de nitrógeno ($kg\ N\ t^{-1}$ caña producida)	77
5.12. Análisis económico de la fertilización nitrogenada	79
VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	82
VIII. LITERATURA CITADA.....	84

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Extracción de nutrimentos del suelo por el cultivo de caña de azúcar (kg ha^{-1}) de acuerdo al rendimiento de tallos molederos.....	9
Cuadro 2. Tasas fotosintéticas reportadas para diferentes variedades de caña de azúcar y especies relacionadas.....	23
Cuadro 3. Principales características de las variedades de caña de azúcar evaluadas en el Ingenio Azsuremex.....	33
Cuadro 4. Distribución aleatoria de los tratamientos en campo.....	35
Cuadro 5. Calculo de los costos variables ($\text{\$ ha}^{-1}$) para los tratamientos de fertilización NPK 00-60-100, 120-60-100 y 180-60-100, en el área de abastecimiento del Ingenio Azsuremex.....	40
Cuadro 6. Contenido de nitrógeno foliar (%) a los cuatro meses de edad, en 10 variedades de caña de azúcar con diferentes dosis de nitrógeno en el Ingenio Azsuremex.....	42
Cuadro 7. Contenido de fosforo foliar (%) a los cuatro meses de edad, en 10 variedades de caña de azúcar con diferentes dosis de nitrógeno en el Ingenio Azsuremex	44
Cuadro 8. Contenido de potasio foliar (%) a los cuatro meses de edad, en 10 variedades de caña de azúcar con diferentes dosis de nitrógeno en el Ingenio Azsuremex	45
Cuadro 9. Unidades SPAD a los cuatro meses de edad, en 10 variedades de caña de azúcar con diferentes dosis de nitrógeno en el Ingenio Azsuremex	47
Cuadro 10. Contenido de clorofila total ($\mu\text{g g}^{-1}$ peso seco) en hojas de 10 variedades de caña de azúcar de cuatro meses de edad con diferentes dosis de nitrógeno en el Ingenio Azsuremex.....	49

Cuadro 11. Tasa fotosintética ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) de cinco variedades de caña de azúcar a los 150 días de edad con diferentes dosis de fertilizante nitrogenado en el Ingenio Azsuremex.....	51
Cuadro 12. Conductancia estomática ($\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) de cinco variedades de caña de azúcar a los 150 días de edad con diferentes dosis de fertilizante nitrogenado en el Ingenio Azsuremex.....	53
Cuadro 13. Concentración interna de CO_2 ($\mu\text{mol CO}_2$) de cinco variedades de caña de azúcar de 150 días de edad con diferentes dosis de fertilizante nitrogenado en el Ingenio Azsuremex.....	55
Cuadro 14. Tasa de transpiración ($\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) de cinco variedades de caña de azúcar de 250 días de edad con diferentes dosis de fertilizante nitrogenado en el Ingenio Azsuremex, Tenosique, Tabasco.....	56
Cuadro 15. Eficiencia en el uso del agua ($\mu\text{mol CO}_2 / \text{mmol H}_2\text{O}$) de cinco variedades de caña de azúcar de 150 días de edad con diferentes dosis de fertilizante nitrogenado en el Ingenio Azsuremex.....	57
Cuadro 16. Calidad de jugo de 10 variedades de caña de azúcar con 0 kg ha^{-1} de nitrógeno.....	65
Cuadro 17. Calidad de jugo de 10 variedades de caña de azúcar con aplicación de 120 kg ha^{-1} de nitrógeno.....	65
Cuadro 18. Calidad de jugo de 10 variedades de caña de azúcar con aplicación de 180 kg ha^{-1} de nitrógeno.....	66
Cuadro 19. Rendimiento (TCH) de 10 variedades de caña de azúcar con diferentes dosis de nitrógeno en el Ingenio Azsuremex.....	68
Cuadro 20. Rendimiento de materia seca de la paja (t ha^{-1}) de 10 variedades de caña de azúcar con diferentes dosis de nitrógeno en el Ingenio Azsuremex.....	69

Cuadro 21 Rendimiento de materia seca de tallos ($t\ ha^{-1}$) de 10 variedades de caña de azúcar con diferentes dosis de nitrógeno en el Ingenio Azsuremex.....	71
Cuadro 22. Rendimiento de materia seca total ($t\ ha^{-1}$) de 10 variedades de caña de azúcar con diferentes dosis de nitrógeno en el Ingenio Azsuremex.....	72
Cuadro 23. Consumo de nitrógeno ($kg\ ha^{-1}$) de la paja de 10 variedades de caña de azúcar con diferentes dosis de nitrógeno en Ingenio Azsuremex.....	74
Cuadro 24. Consumo de nitrógeno ($kg\ ha^{-1}$) de tallos de 10 variedades de caña de azúcar con diferentes dosis de nitrógeno en Ingenio Azsuremex.....	75
Cuadro 25. Consumo de nitrógeno total ($kg\ ha^{-1}$) de 10 variedades de caña de azúcar con diferentes dosis de nitrógeno en Ingenio Azsuremex.....	77
Cuadro 26. Análisis económico de la fertilización nitrogenada para 10 variedades de caña de azúcar y tres dosis NPK (00-60-100, 120-60-100 y 180-60-100), en el Ingenio Azsuremex.....	81

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Parámetros fisiológicos de tres variedades de caña de azúcar en respuesta a la radiación fotosintéticamente activa (PAR). A. Tasa fotosintética, B. Conductancia estomática, C. Concentración interna de CO ₂ y D. Tasa de transpiración.....	59
Figura 2. Seguimiento de madurez de variedades de caña de azúcar con diferentes dosis de nitrógeno.....	63
Figura 3. Relación entre el rendimiento (t ha ⁻¹) y el índice de eficiencia interna de utilización de nitrógeno (EI) (kg N t ⁻¹ caña producida) de diez variedades de caña de azúcar, con tres dosis de fertilización.....	79

I. INTRODUCCIÓN

El campo cañero del Ingenio Azsuremex (IA) de Tenosique, Tabasco, comprende una superficie aproximada de 4, 047 ha, de su actividad dependen directamente 600 familias. El rendimiento promedio de caña de azúcar es de 51.5 t ha^{-1} , que se considera menor a la media nacional de 68.7 t ha^{-1} , lo que afecta los ingresos de los productores (Cañeros, 2015). Esta menor producción se atribuye a la reducción de la fertilidad de los suelos, al retraso en la época de aplicación del fertilizante y al envejecimiento de las plantaciones de caña de azúcar en campo. Los suelos predominantes del campo cañero del IA son: Calcisol, Cambisol, Fluvisol, Leptosol, Luvisol y Vertisol (Salgado *et al.*, 2008). El campo cañero del IA está integrada por 17 variedades (Salgado *et al.*, 2010; Cañeros, 2015) y las dosis de nitrógeno, fósforo y potasio (NPK) que actualmente se aplican se generaron sin considerar la variedad (Salgado *et al.*, 2011), desconociéndose hasta el momento si el requerimiento de nitrógeno (N) es diferente entre variedades. Al respecto, Stevenson *et al.* (1992), Meyer *et al.* (2007), Robinson *et al.* (2007 y 2009), y Weigel *et al.* (2010), demostraron que existen diferencias varietales en el uso de nitrógeno en caña de azúcar, lo cual indica la necesidad de generar recomendaciones de dosis de fertilizante nitrogenado específicas por variedad. En la última década, el uso racional del nitrógeno como fertilizante para el cultivo de caña de azúcar, ha demandado la atención de los especialistas en fertilidad de suelos y en economía, dada la necesidad creciente de conservar el ambiente y al incremento del precio de los fertilizantes (Salgado *et al.*, 2003a; Junguo *et al.*, 2010; Franco *et al.* 2011).

El N es un componente esencial de las células vivas y se encuentra principalmente en las partes jóvenes de las plantas en estado de crecimiento. La planta lo absorbe por las raíces o por las hojas en sus formas solubles; nitratos (NO_3^-), amonio (NH_4^+) y compuestos nitrogenados de

bajo peso molecular (aminas, aminoácidos); una vez dentro de la planta se reduce y transforma finalmente en proteínas. Además de su importancia para formación de proteínas, el N es un constituyente esencial de la molécula de clorofila (Mengel y Kirkby, 2000), su deficiencia produce un amarillamiento de las hojas, cepas de poco vigor y una reducción drástica del rendimiento de caña de azúcar.

El nitrógeno es el nutrimento económicamente más importante, por la frecuencia en que se encuentra como limitante en los cultivos de México y de la mayoría de los países del mundo (Nuñez, 2009). El empleo de dosis de fertilizante nitrogenado mayores a las óptimas implica una inversión económica extra que normalmente no se recuperará ya que el incremento en rendimiento logrado por este aporte adicional es mínimo, ocasionando que el nitrógeno excedente se volatilice o se lixivie a los mantos freáticos produciendo contaminación. Una fertilización adecuada y oportuna del cultivo de caña de azúcar asegurará el logro de altas producciones durante toda su vida económica. Asimismo, es importante entender que la ejecución efectiva y oportuna de la fertilización puede significar la diferencia entre solo recuperar lo invertido o generar un beneficio económico (Romero *et al.*, 2009).

Para mejorar los métodos para recomendar dosis de fertilizantes nitrogenados para variedades de caña de azúcar en el estado de Tabasco, es necesario conocer los requerimientos de nitrógeno de cada variedad, ya que a menudo los suelos del estado no son capaces de proveer todos los nutrimentos con el ritmo y en las cantidades requeridas por el cultivo para lograr máximos rendimientos (Nuñez, 2009). En el caso específico del campo cañero del IA, uno de los requisitos primordiales para mejorar las dosis de fertilización nitrogenada es conocer la variación en el requerimiento de este elemento entre diferentes variedades (Palma-López *et al.*, 2002).

II. OBJETIVOS E HIPÓTESIS

2.1. Objetivo general

Evaluar el efecto de la fertilización nitrogenada sobre parámetros fisiológicos, el contenido nutrimental y el rendimiento de diferentes variedades de caña de azúcar en el Ingenio Azsuremex (IA).

2.2. Objetivos específicos

1. Realizar un diagnóstico nutrimental y de contenido de clorofila en diez variedades de caña de azúcar en el IA.
2. Evaluar el efecto de la fertilización nitrogenada sobre parámetros fisiológicos en caña de azúcar.
3. Determinar el rendimiento en campo de diez variedades de caña de azúcar en el área de abastecimiento del IA con respecto al suministro de nitrógeno.
4. Determinar la variación en el consumo de nitrógeno de diez variedades de caña de azúcar en el IA.
5. Realizar un análisis económico de la fertilización nitrogenada.

2.3. Hipótesis

1. Las variedades de caña de azúcar en el IA presentan diferencias en contenido nutrimental y de clorofila con respecto a la fertilización nitrogenada.
2. Las variedades de caña de azúcar presentan diferencias en parámetros fisiológicos.
3. El rendimiento de tallo de las variedades de caña de azúcar depende de la concentración foliar de nitrógeno.
4. El consumo de nitrógeno es diferente entre variedades.
5. La tasa de retorno al capital variable, es diferente entre variedades y depende de la dosis de nitrógeno aplicada.

III. REVISIÓN DE LITERATURA

3.1. El cultivo de la caña de azúcar

La caña de azúcar constituye el cultivo sacarífero más importante del mundo, responsable del 70 % de la producción total de azúcar (Romero *et al.*, 2009). Se cultiva entre latitudes de 36.7° N y 31° S, y desde el nivel de mar hasta los 1,000 m de altitud. Se le considera esencialmente una planta tropical, aunque se desarrolla exitosamente en las regiones subtropicales. Es un cultivo de larga duración y se desarrolla durante su ciclo de vida en todas las estaciones del año. (Valdez *et al.*, 2008).

En México la industria azucarera es históricamente una de las más importantes, debido a su relevancia económica y social en el campo; genera más de dos millones de empleos, tanto en forma directa como indirecta; se desarrolla en 15 entidades federativas y 227 municipios, generando un valor de producción primaria de alrededor de 30 mil millones de pesos anuales (SAGARPA, 2015). El rendimiento de caña en el país es de 77.5 t ha⁻¹, lo cual lo ubica en el cuarto lugar en la producción de campo a nivel mundial.

En el estado de Tabasco durante la zafra 2013/14, se industrializaron 40,836 ha en tres ingenios, Benito Juárez, S.A (IPBJ), Santa Rosalía de la Chontalpa y Azsuremex (Cañeros, 2015). Esta actividad involucra diferentes superficies agrícolas en siete municipios. Tabasco ocupa el séptimo lugar en superficie sembrada a nivel nacional y el decimocuarto en rendimiento de campo con 56.2 t ha⁻¹, sólo por encima del estado de Campeche (Valdez *et al.*, 2008).

En la zafra 2013/14 en México se industrializaron 790,481 ha; 10,227 más que en la zafra anterior (Cañeros, 2015).

3.2. Requerimientos edafoclimáticos de la caña de azúcar

Los rendimientos a obtener dependerán de la participación interactiva de los distintos componentes del rendimiento, cuya magnitud se define a través de las etapas fenológicas y fisiológicas que acontecen durante el ciclo de cultivo y de sus interacciones con los factores ambientales, el manejo del cultivo y el potencial productivo de la variedad. Pero la producción final de azúcar también depende de la influencia de los factores ambientales durante la zafra y de la eficiencia con que se realice la cosecha y el procesamiento (Romero *et al.*, 2009).

La caña de azúcar crece satisfactoriamente en una gran variedad de tipos de suelos, pero los más adecuados son los de textura franca o franco-arcillosa, bien drenados y los suelos aluviales de textura franca. Tolera un amplio rango de acidez y alcalinidad del suelo y pueden obtenerse altas producciones en suelos con pH entre 5 y 8. Con pH menores a 5 y mayores a 8, la acidez del suelo y los problemas de alcalinidad y salinidad, se convierten en factores limitantes de la producción. Requiere además, suelos provistos de suficientes cantidades de nutrimentos o de buena fertilidad ya que es un cultivo que extrae grandes cantidades de nitrógeno, fósforo, potasio y silicio (Romero *et al.*, 2009). En Tabasco se cultiva en los grupos de suelo Calcisol, Vertisol, Fluvisol, Cambisol, Gleysol, Leptosol y Luvisol (Salgado *et al.*, 2008).

La caña de azúcar debe contar con condiciones climáticas favorables para completar satisfactoriamente las fases de germinación y maduración, los principales componentes del clima que determinan el crecimiento de este cultivo son: temperatura, precipitación, radiación, viento, heladas y granizadas, los dos últimos no son problema del trópico, pero sí de otras latitudes (Salgado *et al.*, 2013a).

La temperatura junto con la humedad son los factores que más relevancia tienen en el proceso de germinación y desarrollo. La temperatura óptima para la germinación de las yemas y el

desarrollo del cultivo se ubica entre los 27 y 33 °C, a valores de 20 °C el crecimiento disminuye notoriamente y, si la temperatura se reduce más, el crecimiento prácticamente se paraliza (Subirós, 1995). Cuando la temperatura es mayor de 35 °C, la respiración aumenta y la tasa fotosintética disminuye, lo que ocasiona una reducción en el crecimiento y, por lo tanto, una menor acumulación de materia seca. A temperaturas superiores a los 36 °C, las plantas pueden mostrar signos de marchitez, aunque exista una buena reserva de agua en el suelo. Las variaciones de temperatura nocturna y diurna influyen en el macollamiento, cuando estas variaciones se presentan y el valor promedio es de 26 °C, este proceso se favorece; sin embargo se reduce cuando los valores son menores a 21 °C (Salgado *et al.*, 2013a).

La caña de azúcar es un cultivo tropical y subtropical que produce una gran cantidad de biomasa y requiere consumos sustanciales de agua y nutrientes para producir los máximos rendimientos (Wiedenfled, 2000). El consumo anual de agua para el cultivo de la caña de azúcar varía de 1,500 a 2,000 mm, con un consumo diario promedio de 5.8 mm de agua (Salgado *et al.*, 2012).

La precipitación pluvial anual promedio en Tabasco fluctúa entre láminas ligeramente mayores a 1,500 mm en las costas incrementándose hacia la sierra hasta llegar a más de 3,500 mm. Para el período de 1941 a 1996 la precipitación promedio anual fue de 2,432.7 mm para el estado (Moguel y Molina-Enríquez, 2000). Tomando en cuenta esta información y el consumo anual de agua por la caña de azúcar podríamos concluir que en el estado de Tabasco no se requiere riego; sin embargo a pesar de la abundancia de agua en Tabasco, existen periodos de sequía donde el riego se hace necesario para mantener la producción de los cultivos ya que la distribución estacional de la precipitación durante el año en el estado no es uniforme. Además la época seca en el estado concuerda con la época de mayor radiación solar la cual no puede ser

aprovechada por los cultivos debido precisamente a la falta de humedad en el suelo (Salgado, 2011). En este sentido y en función de la distribución de la precipitación, en el estado de Tabasco es posible dividir el año en tres épocas desde el punto de vista pluviométrico: lluviosa, de “nortes” y seca (Moguel y Molina-Enríquez, 2000).

3.3. Requerimientos nutricionales

El requerimiento de nutrientes por la caña de azúcar varía según la variedad, el suelo, condiciones climáticas y manejo del cultivo. Los requerimientos de N entre las variedades también son diferentes. Por ejemplo, la variedad CG 96-59 requiere más N que las otras variedades con 1.19 kg N t^{-1} caña. Por su parte, la variedad CP 72-2086 se considera intermedia con una extracción de 1 kg N t^{-1} caña. Variedades como la SP 79-2233 y PGM 89-968 tienen menores requerimientos ya que presentan menores valores de extracción de 0.88 y 0.92 kg N t^{-1} de caña comercial (Melgar *et al.*, 2012).

Los nutrientes requeridos por la caña de azúcar son 19 y pueden ser considerados en tres grupos: los elementos no minerales (C, H y O), los macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg, S y Si) requeridos en concentraciones mayores a 500 mg kg^{-1} de materia seca (Rengel *et al.*, 2011a) y los micronutrientes (Fe, Zn, B, Cu, Cl, Mn, Ni, Na y Mo) que son utilizados en concentraciones menores a 50 mg kg^{-1} de materia seca (Rengel *et al.*, 2011b). Cada nutrimento tiene una función específica en el crecimiento y desarrollo de la planta; la deficiencia o abundancia de uno o más de uno en el suelo se manifiesta en síntomas visuales, principalmente en las hojas; en etapas avanzadas pueden producir enanismo, defoliación, clorosis y como consecuencia una severa disminución del rendimiento del cultivo (Salgado *et al.*, 2013b).

Los períodos críticos de absorción de micronutrientes se ubican en la fase vegetativa y en la etapa de maduración del cultivo. Los micronutrientes Fe, Mn, B y Mo se almacenan en mayor

cantidad en el tejido foliar de la planta, mientras que Cu y Zn se acumulan de forma más pronunciada en los tallos a lo largo del ciclo. Los patrones de acumulación muestran que los requerimientos de micronutrientes son: Fe=5241.5, Cu=121.1 Zn=875.6, Mn=1142.4, B=116.4 y Mo=33.4 g ha⁻¹ en la variedad RB-85-5035 (Rengel *et al.*, 2011b).

La caña es un cultivo que demanda altas cantidades de nitrógeno y potasio, y aunque de este último nutrimento se encuentran cantidades importantes en los suelos cañeros de Tabasco, no por eso se le debe dejar de considerar en las dosis de fertilizante, ya que si no se agrega, poco a poco se agotan las reservas del suelo, el K está relacionado con la calidad de los jugos en la caña de azúcar (Valdez *et al.*, 2008). En el Cuadro 1 se presenta un ejemplo de las cantidades de nutrimentos que puede remover el cultivo de caña de azúcar del suelo.

Cuadro 1. Extracción de nutrimentos del suelo por el cultivo de caña de azúcar (kg ha⁻¹) de acuerdo al rendimiento de tallos molederos.

Elementos	Nutrimento	Rendimiento (t ha ⁻¹)	
		97.0	94.0
		MEX 57-453	MEX 68-P23
Nitrógeno	N	148.67	70
Fósforo	P ₂ O ₅	98.84	76
Potasio	K ₂ O	431.64	354
Calcio	Ca	110.30	49.27
Magnesio	Mg	67.13	33.18
Hierro	Fe	10.02	5.2
Manganeso	Mn	0.15	1.06
Zinc	Zn	0.43	0.73
Cobre	Cu	Trazas	Trazas

Adaptado de Palma-López *et al.* (1995).

El suministro de nutrientes minerales para las plantas es el resultado de la interacción de dos fenómenos: la disponibilidad de nutrientes en el suelo y la habilidad de las plantas de absorberlos. Para que se produzca la absorción de nutrientes, es necesario que exista un contacto

efectivo entre las raíces y los iones del suelo, lo que ocurre en la denominada rizósfera, región en la que interactúan: factores edáficos, crecimiento del sistema radicular y microorganismos (Romero *et al.*, 2009).

3.4. Experiencias sobre fertilización nitrogenada en el cultivo de caña de azúcar

En un experimento de larga duración sobre un Vertisol, durante un período de 18 años que recibió dosis desde 0 hasta 250 kg ha⁻¹ de N la fertilización nitrogenada reveló un efecto positivo sobre los rendimientos agrícolas durante los tres primeros ciclos en las 14 cosechas estudiadas. Además, se produjo una respuesta constante al nitrógeno por parte de todas las cepas evaluadas (Cabrera y Zuaznábar, 2010). El índice de consumo encontrado fue de 1.13 kg N t⁻¹ de caña producida, inferior al aceptado por los productores cañeros cubanos (1.5 kg N t⁻¹ de caña producida), mientras que los contenidos de materia orgánica fueron beneficiados donde se aplicó el elemento, aunque de forma general, con el paso de los años aumentó su contenido en el suelo (Pineda *et al.*, 2014).

Resultados de más de 200 ensayos realizados en las últimas cuatro décadas han demostrado que la respuesta del cultivo de caña de azúcar a la aplicación N puede ser muy variable y que la eficiencia en el uso del N por el cultivo puede ser influenciado por factores ecológicos como temporada, lluvia, naturaleza del suelo así como las prácticas culturales que incluyen variedad, riego, forma de N, velocidad, tiempo y método de aplicación del N. Estos trabajos han permitido clasificar las variedades comerciales de caña de azúcar en tres grupos, de alta eficiencia en el uso del nitrógeno (mayor rendimiento con menor consumo de N), las ineficientes que no responden a la aplicación de N (el rendimiento de caña y azúcar puede verse afectado por aplicaciones de dosis altas de N) y las ineficientes que responden a la aplicación de N; es decir su rendimiento es mayor con dosis altas de N (Meyer *et al.*, 2007).

Robinson *et al.* (2007) realizaron un experimento a nivel invernadero, utilizando 60 genotipos (KQ99), empleando 0.2 mM de nitrato de amonio (NH_4NO_3) como dosis baja de N y 5.0 mM NH_4NO_3 como dosis alta de N. Los resultados de este estudio indicaron que existe una considerable variación genotípica en la población estudiada con respecto al uso eficiente del nitrógeno interno, medido éste como la biomasa producida por unidad de nitrógeno aplicado.

La recuperación del fertilizante nitrogenado por la caña de azúcar es relativamente baja y varía de 20 a 40 % con un máximo de 65 % del fertilizante nitrogenado aplicado y procedente del sistema de caña de azúcar y el suelo. Estas pérdidas se producen por lixiviación de nitratos, volatilización de amoniaco y las emisiones de gases a través de la conversión microbiana de amonio y nitrato. El nitrato es de 5 a 10 veces más móvil en el suelo que fuentes de nitrógeno alternativas como amonio y aminoácidos (Robinson *et al.*, 2011). Los mismos autores plantearon la hipótesis de que la caña de azúcar tiene una preferencia por amonio y una baja capacidad de utilizar nitrato durante los periodos de alta disponibilidad de nitrógeno y que la discriminación contra nitrato contribuye a la pronunciada acumulación de nitratos en los suelos cañeros y pérdidas de nitrógeno posteriores. Concluyen que la discriminación contra nitrato y una baja capacidad para almacenar nitrato en los brotes impiden a variedades comerciales de caña de azúcar tomar ventaja de las altas concentraciones de nitrato de los fertilizantes aplicados en el primer trimestre de la temporada de crecimiento, dejando vulnerables a los nitratos a la pérdida.

3.4.1. Dosis de fertilizante nitrogenado

Se ha determinado que las dosis de N aumentan según el número de cortes, pero éstas aumentan significativamente más en suelos con contenidos bajos de materia orgánica (Cabrera y Zuaznábar. 2010).

La respuesta y la dosis óptima económica de N estimada (DOEN) de la variedad CP 72-2086 a las aplicaciones de distintos niveles de N, en cuatro años consecutivos, en un suelo Molisol con contenido bajo de MO del suelo (1.8 %) fue diferente en cada ciclo de cultivo. En plantilla la aplicación de 50 kg ha⁻¹ de N fue suficiente para alcanzar altos rendimientos de caña, similares a los obtenidos con dosis más altas de N y con una diferencia muy significativa con respecto al testigo no fertilizado (0 N). En primera soca, se observó que la aplicación de 50 kg ha⁻¹ de N ya no fue suficiente y se requirió más de 100 kg ha⁻¹ de N, para mantener rendimientos altos. En segunda y tercera soca, las respuestas a N fueron aún mayores, requiriendo dosis más altas de N para mantener rendimientos adecuados que se logran con las aplicaciones de las DOEN, que fueron variables en cada corte y estimadas de las regresiones cuadráticas ajustadas para cada año en el experimento. Las dosis cada vez mayores de nitrógeno requeridas en la medida que aumenta el número de cortes estarían explicadas en buena parte por la disminución de la tasa de mineralización de la materia orgánica, como una consecuencia de la compactación del suelo, originada principalmente por el tráfico pesado utilizado en el laboreo, alce y transporte de la caña (Pérez, 2012).

En Tucumán, Argentina, Romero *et al.* (2009) trabajando con parcelas experimentales y semi-comerciales demostraron que es factible obtener aumentos promedios de 23 t ha⁻¹ (entre 10 y 55 t ha⁻¹ según suelos) cuando se utiliza la dosis de nitrógeno adecuada y se aplica en la época requerida por el cultivo. Esto significa una expectativa de incremento de producción del 10 al 40 %, respecto del mismo lote no fertilizado. Por estas razones, los productores deben asumir que la fertilización con nitrógeno es una tecnología a la que no pueden renunciar si aspiran a obtener producciones económicamente rentables.

Ambachew y Fantaye (2009) en Wonji-Shoa, Etiopia, realizaron un experimento en 5 diferentes tipos de suelo durante los ciclos de cultivo plantilla, primera, segunda y tercer soca, para determinar la dosis óptima de nitrógeno en caña de azúcar. Emplearon las dosis 0, 23, 46, 69, 92, 115 y 138 kg N ha⁻¹ para el ciclo plantilla y 0, 138, 184, 230, 276, 322 y 368 kg ha⁻¹ de N para las socas, utilizando como fuente de Nitrógeno la Urea 46-00-00. Los resultados obtenidos indicaron que no hubo efecto de interacción entre los grupos de manejo de suelo y las dosis de nitrógeno en ningún ciclo de cultivo. La respuesta de la caña de azúcar a la fertilización nitrogenada fue diferente en cada ciclo de cultivo, en plantilla no hubo diferencia significativa entre las dosis de N y las variables de estudio (número de tallos, rendimiento de caña, rendimiento de azúcar y calidad del jugo) y concluyeron que la dosis óptima de nitrógeno era de 184 kg ha⁻¹ (400 kg ha⁻¹ de urea) para primera y segunda soca y 230 kg ha⁻¹ (500 kg ha⁻¹ urea) para la tercera soca.

Existe una relación lineal positiva entre dosis crecientes de fertilizante nitrogenado y reducción del intervalo de riego sobre el rendimiento de caña de azúcar. La dosis de 240 kg ha⁻¹ de N e intervalos de riego de 2, 3 y 4 semanas afectaron negativamente la calidad del jugo. Cada incremento del intervalo de riego de 1 hasta 4 semanas resultó en una reducción significativa del rendimiento de caña con dosis de 120 y 140 kg ha⁻¹ de N (Yahaya *et al.*, 2010).

Se realizaron experimentos en seis localidades de la provincia de La Habana, Cuba, con diferentes suelos y utilizando 10 variedades de caña de azúcar. Se aplicaron dosis de 0 a 160 kg N ha⁻¹ en plantilla. Los resultados mostraron que la influencia benéfica que ejercen las aplicaciones de fertilizante nitrogenado en el ciclo plantilla en caña de azúcar estuvo relacionada con las variedades y los tipos de suelos. De 13 situaciones diferentes, solo tres variedades, Ja 60-5, C 174-82 y la CB 4452, no produjeron aumentos de los rendimientos. En las condiciones de

diferentes tipos de suelos y variedades utilizadas en los trabajos experimentales, las aplicaciones de fertilizante nitrogenado, en plantilla, produjeron efectos benéficos a las plantaciones en el 77 % de los casos estudiados (Paneque *et al.*, 2005).

Franco *et al.* (2008a) evaluaron la respuesta de la variedad SP-81-3250 a las dosis 0, 40, 80 y 120 kg N ha⁻¹, en los ingenios Pirassununga y Jaboticabal, ubicados en el estado de Sao Paulo, Brasil, la fertilización fue aplicada al momento de la siembra en el fondo del surco. De 169 kg N ha⁻¹ extraídos, la distribución en la planta fue de 50 % en tallos, 22 % en hojas secas, 20 % en las puntas y 8 % en las raíces. El mayor rendimiento de caña se obtuvo con las dosis de 40 kg ha⁻¹ de N como urea (142.0 t ha⁻¹), lo anterior se debe a que durante la preparación del terreno se mineraliza parte del N contenido en la materia orgánica, además de la baja respuesta de las variedades al N en el ciclo plantilla.

Salgado *et al.* (2003b) establecieron un experimento para determinar la dosis de fertilización NPK en un Vertisol serie Limón, con la variedad MEX 69-290, en la región de la Chontalpa, Tabasco. Los rendimientos de caña para los ciclos plantilla, soca y resoca, indicaron que la caña de azúcar respondía significativamente a los tratamientos de fertilización NPK. Los mayores rendimientos en el ciclo de plantilla (158.2 y 143.8 t ha⁻¹) se asociaron con las dosis 160-80-80 y 200-80-80, respectivamente. Esta tendencia se observó en los tres ciclos de cultivo con la dosis 160-80-80. No obstante, los rendimientos obtenidos en los ciclos de soca y resoca fueron menores que el de plantilla (136.0 y 107.0 t ha⁻¹). Esto quizás se deba a que el ciclo plantilla es más largo que los otros y a la pérdida de cepa durante las zafas 1991/93 y 1993/94.

La dosis apropiada de nitrógeno para la caña de azúcar depende de un factor interno, determinado genéticamente por las exigencias de cada variedad, y por numerosos factores

externos que influyen sobre la cantidad que queda de este nutriente a disposición de la planta, y que es aprovechado por ella. Las características del suelo, el clima, los factores bióticos, las prácticas agrícolas empleadas y el nivel de rendimiento, derivado de la integración de esos factores, originan apreciables diferencias entre las localidades en cuanto a la necesidad de nitrógeno que tiene este cultivo (Arzola, 2010).

3.4.2. Épocas de aplicación del fertilizante

Farrukh *et al.* (2012) en Faisalabad, Pakistán, llevaron a cabo un experimento de campo en el que evaluaron el rendimiento del cultivo y la eficiencia en el uso de nitrógeno para identificar los niveles óptimos de este nutrimento en caña de azúcar utilizando la variedad HSF-240, tres dosis de nitrógeno 168, 252 y 336 kg ha⁻¹ y diferentes épocas de aplicación (una sola aplicación al momento de la siembra, una sola aplicación 90 días después de la siembra, 50 % al momento de la siembra y el resto a los 90 días después de la siembra). Los resultados revelaron efectos significativos de la dosis y el tiempo de aplicación de nitrógeno en la mayoría de los parámetros, excepto el porcentaje de sacarosa. El mayor rendimiento y tasa de crecimiento se logró con la dosis 252 kg ha⁻¹ de N en dos aplicaciones. La eficiencia en el uso del nitrógeno varió mucho entre los diferentes tratamientos.

Achieng *et al.* (2013) evaluaron el efecto de diferentes dosis de N y fraccionamientos de la misma en el rendimiento durante el ciclo plantilla de dos variedades de caña de azúcar CO 421 de madurez tardía y D 8484 de madurez temprana, utilizando para ello las dosis 0, 60, 120 y 180 kg ha⁻¹ de N en aplicaciones de 100 % al tercer mes después de emergido el cultivo, 50-50 % al tercer y sexto mes de emergido y 30-30-40 % al tercer, sexto y noveno mes después de emergido, concluyendo que no hubo diferencia significativa en los efectos de la aplicación fraccionada de las dosis de fertilizante nitrogenado sobre el rendimiento de las variedades en

estudio y recomiendan la dosis 120 kg ha⁻¹ de N en una sola aplicación a los tres meses después de emergido el cultivo.

En el estado de desarrollo inicial de la caña de azúcar, la fertilización nitrogenada juega un papel clave en la nutrición del cultivo. En este periodo, hasta un 40 y 70 % del N de la planta es derivado del fertilizante (NDDFF) para plantilla y soca respectivamente. Debido a la creciente contribución de otras fuentes de N durante el desarrollo del cultivo, el NDDFF disminuye a lo largo y, al momento de la cosecha muestra valores entre 5-10 % para plantilla y 10-35 % para soca. El más alto valor de NDDFF explica por qué este ciclo de cultivo presenta una respuesta más consistente a la fertilización nitrogenada en comparación con el ciclo de plantilla, como se ha observado en varios estudios desarrollados bajo condiciones de campo brasileñas en las últimas décadas (Franco *et al.*, 2011).

3.4.3. Fuentes de fertilizantes para el cultivo de caña de azúcar

En el área de abastecimiento del ingenio Azsuremex el 88 % de los productores utiliza como fuente de fertilizantes la fórmula 19 -19 -19, aplicando una dosis de 500 kg ha⁻¹, mientras que el 12 % utiliza la fórmula 17-17-17, aplicando dosis de 500 y 600 kg ha⁻¹ (Salgado *et al.*, 2008). La cantidad de fertilizante y su forma de aplicación está determinada principalmente por la experiencia propia de los productores, ya que no cuentan con asesoría técnica desde que el ingenio se privatizó, ni han utilizado el estudio desarrollado por Palma-López *et al.* (2002), donde se recomiendan cinco dosis de fertilizantes.

Entre las prácticas complementarias que los productores de caña pueden realizar, está la incorporación de los residuos de cosecha de la caña de azúcar anualmente al suelo, ya que éstos, son fuentes complementarias de nitrógeno al cultivo y pueden contribuir a reducir las

necesidades de fertilizante nitrogenado y además, son de vital importancia para el mantenimiento del rendimiento en los entornos altamente degradados (Fortes *et al.*, 2013). Por lo tanto, una mejor comprensión de la dinámica de descomposición de residuos de cultivos, la disponibilidad de nutrientes y tasas de liberación a las plantas puede mejorar el manejo de la fertilización nitrogenada para cultivos de caña de azúcar de alto rendimiento, especialmente cuando se considera la sustitución de cultivos a largo plazo (Dourado-Neto *et al.*, 2010).

3.4.4. Métodos de aplicación del fertilizante

Manual. Consiste en distribuir el fertilizante en forma manual esparcido regularmente o a un lado de la cepa sobre la superficie del surco, uno o dos días antes del aporque y en suelo húmedo (Salgado *et al.*, 2013a).

Mecanizado. En socas y resocas el fertilizante se debe aplicar con equipo mecánico debidamente calibrado para la dosis especificada después del primer cultivo (uno a tres meses). El uso de la fertilizadora mecánica es muy recomendable ya que dosifica la cantidad apropiada de fertilizante en los 10 o 15 cm de profundidad del suelo, evitando las pérdidas del nitrógeno de la urea por volatilización; además de que por la manipulación del suelo, se le considera un segundo cultivo (Salgado *et al.*, 2013a).

De acuerdo con Gava *et al.* (2006), la fertilización se debe realizar antes de los tres meses después de la germinación o rebrote de la caña de azúcar. Sin embargo, en el área de abastecimiento del Ingenio Azsuremex, esta actividad se lleva a cabo cuando las organizaciones: Unión Local de Productores de Caña de azúcar (CNC y CNPR) proporcionan dicho insumo, lo que en algunas ocasiones ocurre después de los 4 o 6 meses del destronque, razón por la cual el

método de aplicación es fundamentalmente manual ya que la altura de la planta no permite la entrada de equipo mecánico para la aplicación.

En el ingenio San Luis del municipio de Pirassununga, Sao Paulo, Brasil, se realiza la cosecha en verde, por lo que es recomendable en el primer ciclo de cultivo aumentar la dosis de N, ya que la relación C: N es de 100, lo que impide la mineralización de los residuos de cosecha. En un neosuelo quartzarenoso cultivado con la variedad SP- 81-3250 segunda soca, las pérdidas de N provenientes de la fertilización en los primeros 20 días de cultivo fueron de 32 y 26 kg ha⁻¹, cuando la urea se aplicó sobre el surco y al voleo. Por otro lado las fuentes sulfato de amonio, nitrato de amonio y una solución nitrogenada, presentaron pérdidas menores de 9 kg ha⁻¹ (Vitti *et al.*, 2007).

En la provincia de Cienfuegos, Venezuela, se realizaron experimentos de campo en tres tipos de suelo que son de gran importancia para el cultivo de la caña de azúcar. El objetivo de estos experimentos fue lograr la mejoría de la efectividad de los fertilizantes nitrogenados en este cultivo. En estos estudios no hubo necesidad de aplicar nitrógeno en plantilla, mientras que en las socas el efecto de la fertilización nitrogenada sobre el rendimiento del cultivo resultó poco frecuente. En los casos con respuesta, las dosis con que se alcanzaron los mejores rendimientos (80.0 t ha⁻¹) fluctuaron entre 70.0 y 90.0 kg ha⁻¹ de N. La necesidad de utilizar nitrógeno para el incremento del rendimiento del cultivo se hace mayor a menor precipitación (menor humedad del suelo), lo cual parece estar asociado a un menor aprovechamiento del nitrógeno por el cultivo. Todo el fertilizante nitrogenado debe ser enterrado cerca del sistema radical, en una sola aplicación, inmediatamente después del corte en soca. No se encontraron efectos residuales del nitrógeno aplicado de una cosecha sobre la siguiente (Arzola y Pablos, 2012).

3.5. Parámetros fisiológicos en caña de azúcar

La productividad del cultivo de caña de azúcar es definida principalmente por la actividad fotosintética que conlleva a la acumulación de sacarosa en el tallo, con mayor énfasis durante la fase final de su ciclo fenológico, ya que se ve afectada en gran medida por eventos bióticos o abióticos lo que incide en el rendimiento (Cha-Um y Kirdmanee, 2008).

Robinson *et al.* (2008) realizaron un experimento para identificar características que confieran un uso eficiente de N (UEN), producción de biomasa, distribución del N en planta y parámetros fisiológicos en siete genotipos de caña de azúcar con dos dosis de nitrógeno 0 y 140 kg ha⁻¹ y dos ciclos de cultivo plantilla y primer soca. Los resultados fueron que no hubo diferencia significativa en la producción de biomasa en los dos ciclos de cultivo y en ambas condiciones, aunque la aplicación de 140 kg ha⁻¹ de N al cultivo resultó en un aumento significativo de N en los tejidos del tallo, pero no en las hojas, lo que indica que el N no fue transportado a las hojas sino que se almacenó en el tallo. Este estudio demostró que el exceso de nitrógeno se almacena como aminoácidos en tallos, lo que resulta en la disminución de la calidad del azúcar. También encontraron que el uso eficiente de nitrógeno en caña de azúcar consiste de diversas características identificadas, como son: i) la obtención rápida de un volumen de hojas combinado con una ineficiente remoción de nitrógeno por hojas senescentes podrían reducir el UEN, ii) el almacenamiento de N en tallos provee un reservorio potencial de N para suministrarlo a tejidos demandantes en la etapa de crecimiento, pero esto difiere entre genotipos.

Whan *et al.* (2010) utilizaron 168 genotipos de caña de azúcar descendientes de un cruzamiento entre el clon IJ76-514 (2n=80) X Q165 (2n~115) y una variedad comercial Q165 para realizar estudios experimentales a nivel invernadero durante tres años (2004-2006) en Brisbane Australia, con el objetivo de identificar locus a efecto cuantitativo (QTL por sus siglas

en inglés) para el crecimiento y características fisiológicas respecto al suministro bajo y alto de nitrógeno (0.2 y 5.0 mM NH_4NO_3 respectivamente). En este experimento los resultados fueron que las plantas cultivadas con una dosis baja de nitrógeno redujeron brotes y biomasa radicular, en comparación con las plantas cultivadas con una dosis alta de nitrógeno, pero el uso eficiente de nitrógeno interno fue mayor cuando se utilizó la dosis baja. Además, se encontraron correlaciones negativas entre la actividad de Glutamina sintetasa de la hoja y la biomasa aérea, así como para nitrógeno total. También encontraron que la variación en el uso eficiente de nitrógeno interno, bajo dosis altas de N puede ser más baja en variedades comerciales que en genotipos no mejorados. Este estudio provee evidencia inicial que QTLs pueden ser incorporados a los programas de mejoramiento genético en caña de azúcar para incorporar el uso eficiente de nitrógeno.

Por otro lado un déficit hídrico reduce significativamente la conductancia estomática, la tasa de transpiración y la tasa fotosintética. La recuperación de la conductancia estomática y la tasa fotosintética se restaura rápidamente al aplicar riego. Las variedades CO775, SL8306, SL7103 y SL88116, las cuales, tuvieron mayor tasa fotosintética (20.9, 27.3, 15.2 y 16.7 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ respectivamente) y eficiencia de transpiración así como, menor conductancia estomática (0.407, 0.373, 0.370 y 0.541 $\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ respectivamente) y menor tasa de transpiración (2.068, 1.374, 1.381 y 2.185 $\mu\text{g cm}^{-2} [\text{área foliar}] \text{s}^{-1}$ respectivamente), mostraron un desarrollo fisiológico comparativamente superior en condiciones de secano. La conservación del agua a través de la reducción de la conductancia estomática en hojas y una mayor tasa de fotosíntesis fueron identificados como algunos mecanismos fisiológicos responsables de la tolerancia a la sequía de la caña de azúcar (De Silva y De Costa, 2009).

3.5.1. Tasa fotosintética

La caña de azúcar es un excelente ejemplo de plantas C-4 en las cuales el primer producto de fijación del CO₂, obtenido de la carboxilación, es un ácido dicarboxílico de cuatro carbonos; el ácido oxalacético, compuesto inestable. Estas plantas presentan una anatomía foliar peculiar, conocida como anatomía de tipo Kranz o en corona donde las células que rodean a los haces vasculares presentan una gran cantidad de cloroplastos. Por ello se dice que en la caña de azúcar se pueden observar dos tipos de células en el parénquima de las hojas: las del mesófilo y las del haz vascular, las cuales se conocen como células BS y están arregladas en anillos concéntricos alrededor de los haces vasculares (anatomía de Kranz). Es en éstas células donde se realiza la fijación de CO₂. En las plantas C-4 las reacciones previas al ciclo de Calvin constituyen la llamada vía de Hatch y Slack (Pérez y Martínez, 1994). La tasa de fotosíntesis de la caña presenta una alta variabilidad, con valores de hasta 61 $\mu\text{m CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (Cuadro 2).

En las variedades de caña existen características que se relacionan con la tasa fotosintética neta (Fn). Así, existe una correlación negativa entre esta tasa y el ancho de la hoja, y positiva con el grosor y el peso específico (mg/dm). En hojas de algunas variedades, la Fn no se correlaciona con el contenido de clorofila, pero sí con la porosidad de la hoja. No se ha encontrado una relación directa entre la tasa fotosintética de las hojas y la producción de caña debido, posiblemente, a los problemas que aún existen para la medición de la Fn en forma consistente y de otros factores como el índice de área foliar y la disposición de las hojas, que inciden en la producción final y enmascaran los efectos de las diferencias en Fn. La tasa fotosintética de la caña de azúcar está estrechamente relacionada con la conductancia estomática, la cual a su vez, es controlada por varios factores, entre los cuales los más importantes son la intensidad de la luz y el balance hídrico del complejo planta-suelo-aire (Amaya *et al.*, 1995).

En caña de azúcar la F_n aumenta con la intensidad de la luz y muestra la característica de las plantas C-4 en el sentido de no alcanzar un nivel de saturación a altas intensidades. En las zonas tropicales, cuando la radiación solar es alta, generalmente en horas del mediodía, los rayos del sol inciden en forma vertical, lo cual favorece una menor intensidad de la iluminación en plantas con hojas erectas, en comparación con plantas de hojas menos erectas, lo cual sugiere que esto puede contribuir a la obtención de mayores producciones de biomasa (Amaya *et al.*, 1995).

Estudios realizados muestran que la caña de azúcar responde positivamente a las altas concentraciones de CO_2 , aunque dicha respuesta es variable. Pereira *et al.* (2008) encontraron que la caña de azúcar mostró una fotosíntesis 35 % mayor en concentraciones altas de CO_2 , aun en condiciones óptimas de agua y nutrientes, versus concentración de CO_2 ambiental, asimismo la producción de biomasa también fue significativa, lo que sugiere que la productividad de la caña de azúcar podría aumentar si aumentará la concentración de CO_2 atmosférico.

Cuadro 2. Tasas fotosintéticas reportadas para diferentes variedades de caña de azúcar y especies relacionadas.

Grupo de plantas	Nombre	Tasa fotosintética ($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	Referencia
Variedades de caña de azúcar	Híbrido no especificado	61	Bull 1969
	Chitton	29	Bull 1969
	Pindar	46	Bull 1969
	HQ409	33	Bull 1969
	10 var. Australianas	21-54	Irvine 1967
	30 var. Australianas	16-24	Irvine 1975
	8 variedades Japonesas	25-44	Nose & Nakama 1990
	H67-5630	30	Grantz 1989
	N14	46*	Allison <i>et al.</i> 1997
	NiF4	34.3	Du <i>et al.</i> 1999
	Badira	28.3	Du <i>et al.</i> 1999
	No especificada	32.5	Ziska & Bunce 1997
	Lahaina	53.9*	Meinzer & Zhu 1998
	H65-7052	45.6*	Meinzer & Zhu 1998
	H73-6110	50.6*	Meinzer & Zhu 1998
	H69-8235	56.8*	Meinzer & Zhu 1998
	H78-7234	46.8*	Meinzer & Zhu 1998
	CP73-1547	31	Vu <i>et al.</i> 2006
	Q138, Q183	30.5, 35.5	Inman-Bamber <i>et al.</i> 2008
	CP 72-2056	29	Vu & Allen Jr 2009
	6 variedades Brasileñas	41.3-60.7	Galon <i>et al.</i> 2009
	RB835486	44	Sage <i>et al.</i> 2014
	Otras especies	<i>S. sinense</i> (2 líneas)	29.5, 30.5
<i>Saccharum sinense</i>		45.8	Meinzer & Zhu 1998
<i>Saccharum robustum</i>		49.2*	Meinzer & Zhu 1998
<i>Saccharum spontaneum</i>		33.4-48.2	Nose <i>et al.</i> 1994
<i>Saccharum spontaneum</i>		55.1	Meinzer & Zhu 1998
<i>A. hypochondriacus</i>		47.1	Ziska & Bunce 1997
<i>Sorghum bicolor</i>		42.5	Ziska & Bunce 1997
<i>Zea mays</i>		52.4	Ziska & Bunce 1997
planas C4		30-70	Larcher 2003
Plantas C3 cultivadas		20-40	Larcher 2003

†La temperatura de la hoja durante las mediciones fueron 25 a 35 °C, y la intensidad de la luz fue mayor a 1,200 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Las mediciones incluyen plantas cultivadas en maceta y en campo y se llevaron a cabo en los niveles de CO₂ atmosférico prevalecientes durante el período de 1965-2011. *Plantas cultivadas con muy alta fertilización nitrogenada. Adaptado de Sage *et al.* (2014).

Kumara y Bandara (2001), en un experimento bajo condiciones de campo, evaluaron el efecto de la aplicación de tres dosis de nitrógeno (0, 100 y 200 kg ha⁻¹) en tres variedades de caña de azúcar, así como el efecto de interacción nitrógeno (N) por variedad sobre parámetros fisiológicos y producción de biomasa. La aplicación de N incrementó significativamente el contenido de N foliar, contenido de clorofila y tasa de fotosíntesis en todas las fechas de muestreo. El contenido foliar de N, contenido de clorofila y tasa fotosintética fueron más bajas en la dosis 0 en aproximadamente 28, 10 y 18 % respectivamente con respecto a la dosis 200 kg ha⁻¹ de N en el muestreo 150 días después de la siembra (DDS). Estos tres factores no fueron significativamente diferentes entre las dosis 100 y 200 kg ha⁻¹ de N en 150 DDS. La más baja tasa fotosintética en 0 N puede estar asociada con una reducción significativa del contenido de N y clorofila foliar. El contenido de N foliar tuvo una correlación positiva con la tasa fotosintética en las tres variedades. La variedad SL8306 fue muy sensible a la aplicación de nitrógeno en comparación con las otras dos variedades, y por lo tanto SL8306 mostró la más baja tasa de fotosíntesis con el contenido de nitrógeno foliar más bajo (1.21 %) y la tasa de fotosíntesis más alta con una mayor concentración de nitrógeno foliar (2.61 %). Las variedades CO775 y SL7130 mostraron mayor tasa fotosintética con concentraciones bajas de N foliar. El Contenido de N foliar y la tasa fotosintética de las tres variedades no fue significativamente diferente. El índice de área foliar (LAI) fue más bajo en la variedad SL8306 sin aplicación de N. La falta de aplicación de N causó una reducción del 28, 18, 28, 10 y 13 % en LAI, tasa fotosintética, contenido de N foliar, contenido de clorofila y acumulación de biomasa en el tallo respectivamente. Los efectos de interacción variedad por nitrógeno no fueron significativos sobre los parámetros fisiológicos medidos. A 270 días de crecimiento de la variedad SL8306 la tasa

fotosintética ($26.98 \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) disminuyó respecto a la observada a los 90 días ($21.67 \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$).

En plantas sin condiciones de cierre estomático se ha observado que la fotosíntesis está correlacionada positivamente con el contenido de clorofila en cualquier estado de desarrollo de la hoja, demostrando que el proceso fotosintético depende de la concentración de clorofila de la lámina foliar y de la ontogenia de la hoja (Arenas *et al.*, 2004).

3.5.2. Densidad y apertura estomática

La densidad estomática se refiere a la cantidad de estomas por unidad de área. Los estomas tienen una función esencial en el mantenimiento de la homeostasis de la planta, especialmente de la regulación de la transpiración y el ingreso de CO_2 requerido en la fotosíntesis. La apertura de los estomas ocurre principalmente en respuesta directa a la luz y en menor grado a la caída en la concentración interna de CO_2 (Chaimsohn *et al.*, 2008).

La velocidad de salida del vapor de agua de los poros estomáticos se mide con la resistencia estomática a la difusión del vapor y se mide como conductancia estomática. Esta es variable entre las especies (Taiz y Zeiger, 2006). La cantidad, distribución, forma, movilidad y el tamaño de los estomas son características específicas de cada especie y pueden ser modificadas en función de las adaptaciones a las condiciones ambientales (Larcher, 2000). En las hojas de la caña de azúcar, los estomas están presentes tanto en el haz como en el envés y una mayor densidad de estos se encuentra en el envés de la hoja (Ferreira, 2005).

El número de estomas de la hoja se establece durante el proceso de crecimiento, y los factores que afectan a esta cantidad son la diferencia en la intensidad de la luz y de la disponibilidad de agua. Una característica muy común en la caña de azúcar, para reducir la transpiración de la

superficie de la hoja en condiciones de estrés hídrico es la aparición de enrollamiento de la hoja, el cual induce a que la planta detenga su crecimiento. Cuando las plantas cierran rápidamente los estomas, esta adaptación es modulativa y reversible. Una adaptación se produce cuando las hojas se desarrollan modificadas en condiciones de estrés hídrico, en el cual tienen estomas más pequeños pero mayor densidad estomática (Paiva y Oliveira, 2006). La mayor densidad y el menor tamaño de los estomas limita una excesiva pérdida de agua por transpiración (Silva *et al.*, 2008).

El control del intercambio de gases se considera un proceso complejo en las plantas, debido a que si hay una ligera disminución en la turgencia, provocará que la absorción de CO₂ sea extremadamente difícil, lo que reduce considerablemente la asimilación del carbono activo, por lo que requieren de los estomas abiertos para la entrada de CO₂ y para evitar la pérdida de agua, pero la tendencia es favorecer la asimilación fotosintética. Bajo estrés hídrico, el intercambio de gases puede mostrar cambios de forma diferente, ya sea por limitaciones difusivas que restringen la disponibilidad de CO₂ como por las limitaciones de efecto metabólico aumentando la foto inhibición (Goncalves *et al.*, 2010).

La caña de azúcar no muestra saturación de luz, incluso a plena luz del sol debido a su mecanismo de concentración de CO₂. Por lo tanto, incluso bajo condiciones óptimas, la conductancia estomática (gs) de caña de azúcar es menor que la de los cultivos C-3. Por lo tanto, la caña de azúcar podría mantener una mayor tasa de F_n a plena luz del sol con las tasas más bajas de transpiración del dosel para aumentar la eficiencia del uso del agua (De Silva y De Costa, 2009).

3.5.3. Concentración interna de CO₂

La concentración interna de CO₂, conocida como Ci de la hoja es considerada una característica fisiológica influenciada por factores ambientales como la disponibilidad del agua, la luz y la energía. Cuanto más alta sea la tasa fotosintética de las especies, más rápido se consume el CO₂ y menor es su concentración en el interior de la hoja, suponiendo que los estomas estén cerrados (Corniani *et al.*, 2006). En una reducción en la tasa fotosintética asociada a cambios en la Ci, Xu y Shen (2002) encontraron que un descenso de la Ci indicó que la causa principal es la reducción de la conductancia estomática.

3.5.4. Contenido de clorofila

La clorofila es el pigmento principal de captura de la energía lumínica para la fotosíntesis, absorbe longitudes de onda del espectro visible, excepto las de la percepción global del verde. Es una molécula compleja que posee un átomo de Mg en el centro, mantenido por un anillo de porfirinas (Hopkins y Hüne, 2004). En las plantas, existen dos tipos de clorofilas diferentes, la clorofila “a” y la clorofila “b” (Rivas, 2000). La clorofila “a” absorbe su energía en longitudes de onda correspondientes a los colores que van del violeta azulado al anaranjado-rojizo y rojo. Los pigmentos accesorios incluyendo a la clorofila b (c, d, y e en algas y protistas), los carotenoides (beta caroteno) y las xantofilas (carotenoide de color amarillo), absorben la energía no absorbida por la clorofila (Hopkins y Hüne, 2004).

La determinación de clorofila en tejidos vegetales (por extracción con acetona a 80 % o con N, N dimetilformamida (Moran, 1982), es un método utilizado para estimar el estado nutrimental del cultivo en lo que se refiere al nitrógeno, magnesio y fierro principalmente (Sachdchina y Dimitrieva, 1995).

El contenido de clorofila en las hojas es una variable clave para la comprensión de las respuestas de una planta al medio ambiente en el que se desarrolla, y por lo tanto es un indicador potencial del grado de estrés, ya que tiene un papel directo en el proceso fotosintético, captura de luz y el inicio de transporte de electrones (Zarco-Tejada, 2002).

Silva *et al.* (2008) llevaron a cabo un experimento utilizando 8 clones de caña de azúcar bajo condiciones de invernadero, con el objetivo de evaluar la posibilidad de que parámetros fisiológicos (contenido de clorofila a través del índice SPAD, pigmentos fotosintéticos (clorofila a, b, a + b, y la relación a/b) y contenido relativo de agua en la hojas) pudieran ser usados para identificar clones de caña de azúcar tolerantes y susceptibles a la sequía. El tratamiento se aplicó 60 días después de la siembra y consistió en someter los clones a un estrés hídrico a través de la suspensión del riego durante 21 días y luego se restableció durante 6 días. Demostraron que es posible distinguir clones de caña de azúcar bajo condiciones de deficiencia de agua durante el crecimiento inicial midiendo el contenido de clorofila y el contenido relativo de agua en las hojas y separaron los ocho clones estudiados en tres grupos; los clones resistentes a la sequía (CP 92-675, HoCP 01-523, TCP 89-3505 y TCP 87-3388) que mostraron menor degradación de la clorofila y mayor capacidad para preservar el agua en las hojas durante el crecimiento inicial, los clones con tolerancia intermedia (HoCP 85-845, TCP 02-4620 and TCP 02-4624) y los clones susceptibles (L 01-283) en el cual la degradación de la clorofila fue irreversible al restablecer el riego.

3.5.5. Unidades SPAD

Los valores SPAD se basan en el principio de que parte de la luz que llega a la hoja es absorbida por la clorofila y el resto que se refleja entra en contacto con la celda detectora del SPAD-502 y es convertida en una señal eléctrica. La cantidad de luz captada por la celda es

inversamente proporcional a la cantidad de luz utilizada por la clorofila, la señal es procesada, y la absorbancia es cuantificada en valores dimensionales que van de 0 a 199, por lo que las unidades SPAD serán siempre las mismas de acuerdo con el tono verde de las hojas (Krugh *et al.*, 1994).

De acuerdo con Torres *et al.* (2005), en hojas de café, un índice SPAD por debajo de 40 indica el comienzo de una deficiencia de clorofila, que afecta el proceso de fotosíntesis. Este parámetro se considera que es un buen indicador de perturbaciones en las plantas afectadas por factores ambientales.

Jaroenseng *et al.* (2010) demostraron que la concentración de nitrógeno en hojas de caña de azúcar se correlaciona con los valores SPAD y encontraron que lecturas de unidades SPAD mayores a 34 en hojas de caña de azúcar son consideradas como una concentración suficiente de nitrógeno y lecturas menores a 34 son consideradas como una concentración deficiente de nitrógeno.

3.5.6. Acumulación de sacarosa

La caña de azúcar, posee la característica particular de almacenar los fotoasimilados en forma de sacarosa en vez de almidón como la mayoría de las plantas por lo que la sacarosa es el azúcar que se encuentra en mayor concentración en sus tallos. El éxito económico del cultivo de caña de azúcar se determina por la acumulación de sacarosa (Batta *et al.* 2002). La síntesis de sacarosa se realiza en el citosol. La glucosa y la fructosa libres no son precursores importantes de la sacarosa, pero sí lo son las formas fosforiladas de éstas. Las triosas-P sintetizadas mediante el ciclo de Calvin pueden ser utilizadas competitivamente para la síntesis transitoria de almidón en el cloroplasto o de sacarosa en el citoplasma de las células de los tejidos foto sintetizadores de

las hojas. La distribución de éstas hacia uno u otro organelo depende de varios factores, principalmente de la demanda y capacidad de translocación de la sacarosa hacia otras zonas de la planta (Taiz y Zeiger, 2006).

La demanda de las zonas no productoras, se ha vinculado con las enzimas del metabolismo de la sacarosa en estos sitios, tales como las invertasas: Neutra (IN), Ácida Soluble (IAS) y Ácida Insoluble (IAI), la Sacarosa Sintasa (SS) y la Sacarosa Fosfato Sintasa (SFS). En especial, las invertasas ácidas (IAS y IAI) han sido estrechamente relacionadas con las fuentes de demanda en las plantas, por su posible papel de aumentar el gradiente de sacarosa entre el apoplasto y el floema al hidrolizarla a glucosa y fructosa (Minic, 2008).

El peso del tallo no es un buen indicador de la concentración de sacarosa. Con base en la concentración de sacarosa en los entrenudos, la IAS podría considerarse la enzima principal, o limitación clave en la acumulación de este azúcar (Gutiérrez *et al.*, 2002).

3.6. Índice de área foliar

El índice de área foliar (IAF), es otro parámetro importante para la determinación de la productividad, se define como el área foliar por unidad de superficie del suelo. La determinación del área foliar es fundamental en la evaluación del desarrollo y crecimiento de los cultivos, en estudios de requerimiento hídrico, eficiencia bioenergética y en la determinación de daños producidos por patógenos y plagas. Además, por su estrecha relación con la intercepción de la radiación solar, con la fotosíntesis y con el proceso de transpiración, aspectos fuertemente vinculados a la acumulación de biomasa y a la productividad, constituye una información básica para la modelación del crecimiento, desarrollo y rendimiento agronómico de los cultivos (De Oliveira *et al.*, 2007).

Para la medición del área foliar se dispone de varios procedimientos; tanto destructivos como no destructivos, cuya elección dependerá de las características del cultivo, de la cantidad de material a evaluar, del tamaño de las muestras, del nivel de precisión requerido y de las disponibilidades de tiempo, de personal y de los equipos. Determinando el número de hojas verdes liguladas por tallo y su altura al anillo de la hoja +1 y/o adicionando la medición del área individual de la hoja +3 de cada tallo, se puede estimar de manera no destructiva, rápida y con alta precisión, el área foliar por tallo de la variedad de caña de azúcar LCP 85-384, durante las distintas fases del ciclo del cultivo (Brito *et al.*, 2007).

3.7. Tasa de crecimiento

La tasa de crecimiento de la caña se mide en términos de materia seca (MS) producida por unidad de área y tiempo. El tallo es la parte de la planta que tiene la mayor importancia económica, y con frecuencia se utilizan el número y la tasa de elongación de éste para estimar el crecimiento. Durante los primeros 3 meses de crecimiento de la planta ocurre un período en el cual el macollamiento es rápido y el alargamiento de los tallos es mínimo. Luego, cuando aumenta la biomasa del cultivo, hay poca luz en la parte basal de la planta y, como consecuencia, el macollamiento es mínimo y muchos de los tallos formados se mueren. A partir del quinto mes, el número de tallos permanece más o menos estable. El déficit de agua durante el período de macollamiento reduce el número de tallos; sin embargo, si el déficit no es severo, este efecto, generalmente, desaparece una vez que se regula el suministro de agua (Amaya *et al.*, 1995).

IV. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. Ubicación y características del sitio experimental

El experimento se realizó en condiciones de temporal, en el ciclo plantilla 2014/2015, en el área de abastecimiento del Ingenio Azsuremex (IA) ubicado en el municipio de Tenosique, Tabasco. El IA se dedica a la elaboración de azúcar estándar y como subproducto genera melaza.

El sitio de estudio se localiza en el Ejido Rancho Grande, en Tenosique, Tabasco, a 17°25' latitud Norte y 91° 24' latitud Oeste, con una altitud de 60 msnm, temperatura promedio anual de 26 °C, la precipitación promedio anual es de 1,595 mm, y la humedad relativa promedio anual es de 83 %. El suelo es un Cambisol Háptico (Límico-Éutrico-Calcárico) (Salgado *et al.*, 2008).

4.2. Preparación del terreno

La preparación del terreno se llevó a cabo el 08 de enero del 2014. Esta labor consistió en volteo de cepa, con el uso de una rastra de discos se realizaron tres pases de rastra cruzada y el surcado a una separación entre hileras de 1.3 m. La siembra se realizó de forma manual el 12 de enero del 2014 con las variedades indicadas en el Cuadro 3, las cuales son provenientes de plantaciones de aproximadamente 10 meses de edad.

4.3. Manejo agronómico

Consistió en la aplicación de herbicida Diuron® en forma pre-emergente al cultivo y a la maleza después de la siembra, la fertilización manual se realizó el 8 de marzo del 2014 (a los dos meses de edad del cultivo), realizar un pase de cultivo con ganchos inmediatamente después de la fertilización, aplicación de herbicida post emergente (Hexaxinona® + Diuron®) al inicio de las lluvias, un chapeo manual, y una aplicación de herbicida Picloram® + 2,4-D Amina® para el control de malezas de hoja ancha, de acuerdo con el paquete tecnológico generado por el Grupo MASCAÑA.

Cuadro 3. Principales características de las diez variedades de caña de azúcar evaluadas en el Ingenio Azsuremex.

Variedades	Rendimiento potencial (t ha ⁻¹)	Resistencia a enfermedades				
		Roya	Escaldadura	Carbón	VMCA	Madurez
COLPOSCTMEX 06-039	106	R	-	R	-	ME
COLPOSCTMEX 06-271	127	R	-	R	-	ME
COLPOSCTMEX 06-474	120	T	-	R	-	ME
COLPOSCTMEX 2362	97	R	-	R	-	ME
COLPOSCTMEX 05-223	127	R	-	R	-	ME
ATEMEX 96-40	120	R	T	R	R	ME
RD 75-11	100	R	MR	S	-	ME-TA
MEX 69-290	100	R	T	R	R	ME
MEX 68-P23	100	R	T	R	R	ME-TA
CP 72-1210	100	R	R	MR	T	ME

†R= Resistente, MR= Moderadamente Resistente, T= Tolerante, S= Susceptible, ME= Media, TA=Tardía.

4.4. Diseño experimental y tratamientos

Se utilizó un diseño de parcelas divididas en bloques completos al azar, donde la parcela grande fueron las 3 dosis de N: 0, 120 y 180 kg ha⁻¹ de N, usando como fuente Urea. La parcela chica correspondió a las 10 variedades de caña de azúcar. El diseño generó 30 tratamientos y constó de cuatro repeticiones, lo cual dio 120 parcelas experimentales (Cuadro 4). La parcela experimental fue de 4 surcos x 12 m lineales.

4.5. Variables de estudio

4.5.1. Diagnóstico foliar

A los 4 meses de edad del cultivo, se realizó el muestreo foliar, tomando la muestra en la hoja 4, a la cual se le eliminó la base, la punta y la nervadura central (Jones *et al.*, 1991). La lámina foliar se depositó en un sobre de papel manila y se almacenó en una hielera a 4 °C, para su posterior procesamiento y análisis en el LASPA-Colegio de Postgraduados-Campus Tabasco.

En el LASPA, la lámina foliar se secó a 60 °C por 24 h y se molió en malla de 2 mm en molino Wiley para la determinación de N, P, K por el método de Kjeldahl, extracción HNO₃-HClO₄ cuantificación colorimétrica y extracción HNO₃-HClO₄ cuantificación por espectrofotometría de absorción atómica, respectivamente (NOM-021-RECNAT-2001).

Cuadro 4. Distribución aleatoria de los tratamientos en campo.

RI						RII					
180-60-100		120-60100		00-60-100		120-60-100		180-60-100		00-60-100	
RD 75-11	COLPOSCT MEX 05-223	COLPOSCT MEX 06- 2362	COLPOSCT MEX 05-223	COLPOSCT MEX 06-474	MEX 68-P23	COLPOSCT MEX 06- 2362	ATEMEX 96-40	RD 75-11	COLPOSCT MEX 06-474	COLPOSCT MEX 06-039	ATEMEX 96-40
COLPOSCT MEX 06 039	MEX 68-P23	COLPOSCT MEX 06-474	ATEMEX 96-40	COLPOSCT MEX 06-039	COLPOSCT MEX 06- 2362	COLPOSCT MEX 06-271	COLPOSCT MEX 06-474	COLPOSCT MEX 06-039	COLPOSCT MEX 05-223	MEX 69-290	RD 75-11
COLPOSCT MEX 06-474	ATEMEX 96-40	MEX 68-P23	COLPOSCT MEX 06-039	COLPOSCT MEX 05-223	MEX 69-290	MEX 69-290	COLPOSCT MEX 05- 223	ATEMEX 96-40	COLPOSCT MEX 06-271	COLPOSCT MEX 05-223	COLPOSCT MEX 06-474
COLPOSCT MEX 06- 2362	CP 72-1210	MEX 69-290	COLPOSCT MEX 06-271	COLPOSCT MEX 06-271	CP 72-1210	MEX 68-P23	CP 72-1210	MEX 69-290	CP 72-1210	CP 72-1210	COLPOSCT MEX 06- 2362
MEX 69-290	COLPOSCT MEX 06-271	RD 75-11	CP 72-1210	RD 75-11	ATEMEX 96-40	COLPOSCT MEX 06-039	RD 75-11	COLPOSCT MEX 06- 2362	MEX 68-P23	COLPOSCT MEX 06-271	MEX 68-P23
RIII						RIV					
00-60-100		180-60-100		120-60-100		120-60-100		00-60-100		180-60-100	
CP 72-1210	COLPOSCT MEX 06- 039	ATEMEX 96-40	COLPOSCT MEX 06-474	MEX 69-290	COLPOSCT MEX 06- 2362	MEX 68-P23	COLPOSCT MEX 06-039	MEX 68-P23	ATEMEX 96-40	RD 75-11	COLPOSCT MEX 05-223
ATEMEX 96-40	RD 75-11	RD 75-11	COLPOSCT MEX 06-271	ATEMEX 96-40	COLPOSCT MEX 06-271	CP 72-1210	COLPOSCT MEX 06-271	COLPOSCT MEX 05-223	COLPOSCT MEX 06-474	CP 72-1210	ATEMEX 96-40
MEX 69-290	COLPOSCT MEX 06- 2362	MEX 69 290	MEX 68-P23	COLPOSCT MEX 06-039	COLPOSCT MEX 05-223	MEX 69-290	ATEMEX 96-40	COLPOSCT MEX 06-039	MEX 69-290	MEX 68-P23	COLPOSCT MEX 06- 2362
COLPOSCT MEX 06-474	MEX 68-P23	COLPOSCT MEX 06-039	COLPOSCT MEX 05-223	RD 75-11	COLPOSCT MEX 06-474	COLPOSCT MEX 05-223	COLPOSCT MEX 06- 2362	CP 72-1210	RD 75-11	COLPOSCT MEX 06-474	COLPOSCT MEX 06-039
COLPOSCT MEX 05-223	COLPOSCT MEX 06-271	CP 72-1210	COLPOSCT MEX 06- 2362	MEX 68-P23	CP 72-1210	RD 75-11	COLPOSCT MEX 06-474	COLPOSCT MEX 06-271	COLPOSCT MEX 06- 2362	COLPOSCT MEX 06-271	MEX 69-290

4.5.2. Determinación del contenido de clorofila en hojas de caña de azúcar

El muestreo foliar para determinar clorofila se realizó a los 4 meses de edad del cultivo, con un horador circular de 1 cm² se obtuvieron de la hoja 4 seis discos por tratamiento. Tres discos se colocaron en un tubo de ensayo de 10 mL conteniendo 5 mL de N, N dimetilformamida, protegido de la luz y conservado a 4 °C para su transporte al Laboratorio (Moran, 1982). En el laboratorio, las muestras continuaron la incubación a temperatura ambiente y en la oscuridad hasta completar 24 h. Las absorbancias se leyeron a 480, 647 y 664 nm en un Espectrofotómetro UV-Visible marca Thermo Scientific modelo Multiskan go. Los tres discos restantes se utilizaron para determinar el peso seco a 60 °C. En la misma fecha se tomaron cuatro lecturas por tratamiento en la hoja 4 con un medidor portátil de clorofila SPAD-502 y se realizó una correlación entre las unidades SPAD y el contenido de clorofila total.

La concentración de clorofila “a”, clorofila “b”, clorofila total y carotenoides totales se calcularon de acuerdo a las siguientes ecuaciones:

Moran (1982)

$$\text{Clorofila a} = 12.64 (A_{664}) - 2.99 (A_{647})$$

$$\text{Clorofila b} = 23.26 (A_{647}) - 5.6 (A_{664})$$

$$\text{Clorofila total} = 7.04 (A_{664}) + 20.27 (A_{647})$$

A_{647} = lectura de absorbancia a 647 nm.

A_{664} = lectura de la absorbancia a 664 nm.

Donde:

C_t = Clorofila a + Clorofila b expresada en $\mu\text{g cm}^{-2}$ (si utilizó 1 cm²) o μg (si pesó x cantidad de tejido).

Wellburn (1994) expresadas en $\mu\text{g cm}^{-2}$ o μg según sea el caso

$$\text{Dimetilformamida } C_a = 12A_{664} - 3.11A_{647}$$

$$C_b = 20.78A_{647} - 4.88A_{664}$$

$$C_{X+C} = (1000A_{480} - 1.12C_a - 34.07C_b)/245$$

Donde:

C_a = Clorofila “a”

C_b = Clorofila “b”

C_{X+C} = Carotenoides totales.

A_{480} = lectura de la absorbancia a 480 nm.

4.5.3. Parámetros fisiológicos

En la hoja 4 de diez cepas centrales en cada tratamiento en las variedades ATEMEX 96-40, RD 75-11, MEX 68-P23, MEX 69-290 y COLPOSCTMEX O5-223, a los 150 días después de la siembra se realizaron mediciones por triplicado de la tasa fotosintética, A ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), conductancia estomática, g_s ($\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), concentración interna de CO_2 , C_i ($\mu\text{mol mol}^{-1}$) y tasa de transpiración, E ($\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), utilizando un sistema portátil de fotosíntesis (LI-COR modelo LI6400) equipado con una fuente de luz azul/roja (LI6400-02B) a una radiación fotosintéticamente activa de $1500 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Solo se utilizaron las cinco variedades mencionadas para poder realizar las mediciones en un mismo día (de 9:00 a 14:00 horas), las variedades seleccionadas fueron las a la vista presentaban mayor crecimiento. Además para conocer la respuesta a la radiación incidente (PAR), se realizaron curvas de respuesta donde la PAR fue gradualmente disminuida de 2000 a $0 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ($2000, 1500, 1000, 500, 200, 100, 50, 20,$ and $0 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) en las variedades ATEMEX 96-40, RD 75-11 y COLPOSCTMEX O5-223 con la dosis 180 kg N ha^{-1} .

4.5.4. El rendimiento

La cosecha se llevó acabo a los 14 meses de edad del cultivo debido a que este sufrió quema accidentada el 21 de marzo de 2015. Se contaron los tallos molederos en 10 m lineales para obtener el número de tallos por m lineal y posteriormente este valor, se multiplicó por 7692 que es la cantidad de m lineales ha⁻¹ de caña surcada a 1.3 m de distancia para obtener el número de tallos ha⁻¹, se tomó una muestra de 10 tallos, los cuales se pesaron con punta y sin punta para obtener el peso promedio de los tallos y de la punta, con ello se obtuvo el rendimiento en toneladas de caña por hectárea (t ha⁻¹) de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$\text{Rendimiento (t ha}^{-1}\text{)} = (\text{Peso promedio de tallos}) (\text{número de tallos ha}^{-1}\text{)}.$$

4.5.5. La calidad del jugo

A partir de los 11 meses para llevar un control de la madurez, se llevó un registro quincenal de los grados Brix, para ello, en cada parcela se tomaron tres tallos a los cuales se les extrajo el jugo del primero, segundo, y tercer tercio utilizando para ello un punzón de acero inoxidable. Las lecturas de grados Brix se realizaron usando un refractómetro digital marca ATAGO. A la cosecha, se tomó una muestra de cada parcela con la metodología utilizada en el departamento de precosecha del Ingenio Presidente Benito Juárez (IPBJ), para determinar los grados Brix y el porcentaje de sacarosa por el método Pol ratio: Pol, fibra y azúcares reductores.

4.5.6. Consumo de nitrógeno

En cada tratamiento se determinó el contenido de materia seca del tallo y de la paja respectivamente, de esta se tomó una submuestra para determinar la concentración de nitrógeno en cada componente y así determinar el consumo de este nutrimento (kg ha⁻¹). La determinación del contenido de nitrógeno se realizó por el método de Kjeldahl, en el laboratorio agroindustrial de suelos, plantas y aguas de Colegio de Postgraduados Campus Tabasco. Para determinar el

contenido de paja, se multiplicó el rendimiento (k ha^{-1}) por 0.3 de acuerdo con la relación paja:tallo obtenida por Salgado *et al.* (2008) para el área de abastecimiento del Ingenio Azsuremex.

El índice de eficiencia interna de utilización de nitrógeno (EI) se determinó utilizando la siguiente ecuación (Boaretto *et al.*, 2007).

$$\text{EI} = \text{Consumo de nitrógeno (kg ha}^{-1}\text{)} / \text{rendimiento de caña (t ha}^{-1}\text{)}.$$

4.5.7. Análisis económico de la fertilización nitrogenada

Se realizó de acuerdo con la metodología del CIMMYT (1988) donde el tratamiento óptimo económico es aquel que proporciona la máxima tasa de retorno. Para el cálculo de los costos variables de los tratamientos de fertilización, se consideraron los costos del flete del fertilizante a la parcela, carga y descarga, el costo de la aplicación manual (de acuerdo con el paquete tecnológico para el cultivo de caña de azúcar para la zafra 2014/2015 del Ingenio Azsuremex) y el costo del fertilizante tomando como referencia los precios de la Urea, SPT y KCl de FYPA S.A., precios vigentes al 18 de junio del 2015 (Cuadro 5).

El precio de la caña para la zafra 2013/2014 para el Ingenio Azsuremex fue \$ 383.800 (Cañeros, 2105), el cual, junto con el rendimiento (t ha^{-1}) se usaron como base para determinar el ingreso neto + costos fijos IN+CF ($\text{\$ ha}^{-1}$).

El incremento en rendimiento se obtuvo de la diferencia entre el tratamiento testigo y las dosis crecientes; mientras que el incremento en IN+CF fue resultado de la diferencia entre el IN+CF del tratamiento testigo y los tratamientos con dosis crecientes de fertilizante.

La tasa de retorno al capital variable se obtuvo dividiendo el incremento en IN+CF entre los costos variables para cada tratamiento.

Cuadro 5. Calculo de los costos variables (\$ ha⁻¹) para los tratamientos de fertilización NPK 00-60-100, 120-60-100 y 180-60-100.

variables	00-60-100		120-60-100		180-60-100	
	Jornales	Costo (\$ ha ⁻¹)	Jornales	Costo (\$ ha ⁻¹)	Jornales	Costo (\$ ha ⁻¹)
Costo del fertilizante N	-	-	-	1716	-	2574
Flete, carga y descarga N	-	-	-	100	-	150
Costo aplicación N	-	-	2	300	3	450
Costo del P	-	1242	-	1242	-	1242
Flete, carga y descarga P		50	-	50	-	50
Costo aplicación P	1	150	1	150	1	150
Costo del K	-	1170	-	1170	-	1170
Flete, carga y descarga K	-	50	-	50	-	50
Costo aplicación K	1	150	1	150	1	150
Costo variable		2812		4928		5986

4.6. Análisis estadístico

Para el diagnóstico nutricional, unidades SPAD, contenido de clorofila, parámetros fisiológicos, rendimiento y consumo de nitrógeno, se realizó el análisis de varianza bajo un arreglo en parcelas divididas. Se realizó la prueba de medias de Tukey para determinar las diferencias significativas entre variedades y dosis de N. Se realizó un análisis de correlación de Pearson entre el contenido de nitrógeno foliar, el contenido de clorofila y Unidades SPAD. Los análisis estadísticos se realizaron utilizando el paquete estadístico SAS versión 9.0.

V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. Diagnóstico nutricional

5.1.1. Concentración de nitrógeno foliar

De acuerdo a los resultados del análisis de varianza (ANOVA) se observa diferencia estadística significativa para la concentración de nitrógeno foliar a los cuatro meses de edad con respecto al efecto de variedad (V) y no significativa con respecto a las dosis de nitrógeno (N) y la interacción NxV. El coeficiente de variación (C.V) de 6.1 % indica alta precisión en la determinación de este parámetro (Cuadro 6). Resultados similares fueron obtenidos por Robinson *et al.* (2008), quienes señalan que la aplicación de 140 kg ha⁻¹ de N (dosis alta) al cultivo de caña de azúcar resultó en un aumento significativo de N en los tejidos del tallo, pero no en las hojas, infiriendo que el N no fue transportado a las hojas sino que se almacenó en el tallo lo que puede afectar la calidad del azúcar, si se encuentra en exceso (Yang *et al.* 2013). Sin embargo, difieren a lo reportado por Kumara y Bandara (2001), donde la aplicación de fertilizante nitrogenado incrementó significativamente la concentración de nitrógeno foliar en variedades de caña de azúcar de Sri Lanka, aunque la respuesta varietal fue diferencial. El tratamiento sin aplicación de N redujo esta variable 28 % en comparación con el tratamiento con aplicación de 200 kg ha⁻¹ de N en el muestreo realizado 150 días después de la siembra.

De acuerdo con la prueba de Tukey, se formaron dos grupos con respecto al contenido foliar de N, siendo la variedad COLPOSCTMEX 06-039 la que presentó el mayor contenido de N foliar (1.89 %) y la COLPOSCTMEX 06-2362, presentó el menor contenido de N foliar (1.7 %).

Cuadro 6. Contenido de nitrógeno foliar (%) a los cuatro meses de edad, en 10 variedades de caña de azúcar con diferentes dosis de nitrógeno en el Ingenio Azsuremex.

Variedades	Dosis N (kg ha ⁻¹)			Media variedad†
	0	120	180	
COLPOSCTMEX 06-039	1.86	1.92	1.89	1.89a
COLPOSCTMEX 06-271	1.72	1.77	1.75	1.74ab
COLPOSCTMEX 06-474	1.86	1.86	1.87	1.86ab
COLPOSCTMEX 06- 2362	1.74	1.71	1.66	1.70b
COLPOSCTMEX 05-223	1.77	1.95	1.82	1.85ab
ATEMEX 96-40	1.87	1.77	1.89	1.84ab
RD 75-11	1.66	1.77	1.77	1.73ab
MEX 69-290	1.77	1.74	1.83	1.78ab
MEX 68-P23	1.83	1.84	1.74	1.80ab
CP 72-1210	1.71	1.74	1.70	1.72ab
Media dosis (N)†	1.78a	1.81a	1.79a	1.79
C.V (%)	6.1			
Prob. F:				
Dosis N (N)	0.58 NS			
Variedades (V)	0.003*			
Interacción (N×V)	0.82 NS			

†Medias con la misma literal dentro de la hilera o columna son iguales estadísticamente Tukey ($P \leq 0.05$). NS: no significativo, * Significativo.

El contenido promedio de N foliar para las variedades fue de 1.79 %. En la literatura existen diferentes estándares para interpretar las concentraciones foliares de este nutrimento en hojas de caña de azúcar, de acuerdo con Jones *et al.* (1991) el contenido promedio de N de las variedades se clasifica como bajo (1.6-1.9 % N); mientras que para Halliday y Trenkell (1992) la concentración de N se clasificaría como adecuada (1.5-1.7 % N). En este caso el volteo del cultivo anterior y la incorporación de sus residuos, probablemente favorecieron el proceso de mineralización de la materia orgánica del suelo con la consecuente liberación de N en cantidad

suficiente para satisfacer la demanda del cultivo, ya que la concentración foliar de N en las tres dosis de N aplicado fue similar, minimizando el efecto de la fertilización nitrogenada en este ciclo plantilla.

5.1.2. Contenido de fósforo foliar (%)

Al igual que para N foliar, no se observó diferencia significativa para P foliar con respecto a la dosis de nitrógeno, variedades, ni para la interacción N x V, como habría de esperarse ya que la dosis de P₂O₅ aplicada fue igual para todos los tratamientos (Cuadro 7). El coeficiente de variación de 13.8 % se considera adecuado por tratarse de un experimento bajo condiciones de campo. El contenido promedio de fósforo foliar fue de 0.20 % el cual, de acuerdo con Jones *et al.* (1991) es considerado como medio (0.18-0.30 %) y para Halliday y Trenkell (1992) es adecuado (0.18-0.22 %). Este resultado indica que la dosis de fertilizante fosforado recomendada para el área de estudio (60 kg de P₂O₅) y aplicada al estudio es adecuada (Salgado-García *et al.*, 2010).

5.1.3. Contenido de potasio foliar (%)

Para el caso del potasio foliar (K) a los cuatro meses de edad, el ANOVA muestra diferencia altamente significativa para el efecto de variedades y no significativa para el efecto de dosis de N y la interacción NxV. El coeficiente de variación de 18.7 % se considera adecuado (Cuadro 8).

La prueba de Tukey agrupa a las 10 variedades en tres grupos en los cuales las variedades COLPOSCTMEX 06-271 y COLPOSCTMEX 05-223 conforman el grupo con mayor porcentaje de K foliar (0.79 y 0.80 % respectivamente), las variedades COLPOSCTMEX 06-039, COLPOSCTMEX 06-474, ATEMEX 96-40, RD 75 11, MEX 69-290 y MEX 68-P23 conforman el segundo grupo con un contenido de 0.62-0.64 % de K y el tercer grupo está formado por las

variedades COLPOSCTMEX 06- 2362 y CP 72-1210 con un contenido de 0.51 y 0.55 % de K respectivamente.

Cuadro 7. Contenido de fósforo foliar (%) a los cuatro meses de edad, en 10 variedades de caña de azúcar con diferentes dosis de nitrógeno en el Ingenio Azsuremex.

Variedades	Dosis N (kg ha ⁻¹)			Media variedad†
	0	120	180	
COLPOSCTMEX 06-039	0.21	0.22	0.22	0.22a
COLPOSCTMEX 06-271	0.22	0.21	0.21	0.21a
COLPOSCTMEX 06-474	0.20	0.21	0.23	0.21a
COLPOSCTMEX 06-2362	0.21	0.20	0.21	0.21a
COLPOSCTMEX 05-223	0.21	0.20	0.20	0.20a
ATEMEX 96-40	0.26	0.25	0.18	0.23a
RD 75-11	0.22	0.20	0.15	0.19a
MEX 69-290	0.18	0.19	0.19	0.19a
MEX 68-P23	0.20	0.20	0.20	0.20a
CP 72-1210	0.21	0.21	0.20	0.20a
Media dosis (N)†	0.21a	0.21a	0.20a	0.20
C.V (%)	13.8			
Prob. F:				
Dosis N (N)	0.16NS			
Variedades (V)	0.08NS			
Interacción (NxV)	0.25NS			

†Medias con la misma literal dentro de la hilera o columna son iguales estadísticamente Tukey ($P \leq 0.05$). NS: no significativo.

El valor promedio del contenido de K foliar de las 10 variedades varió de 0.51-0.80 % considerado como bajo (Halliday y Trenkell, 1992), lo que parece indicar que la dosis de 100 kg ha⁻¹ de K₂O aplicada no fue suficiente para suplir los requerimientos de este nutriente por las variedades de caña de azúcar en estudio. Lo anterior sugiere la necesidad de revisar la dosis de K aplicada en función del contenido de éste en el suelo Cambisol. Este suelo presentó un bajo

contenido de K, 0.12 cmol (+) kg⁻¹ y altas concentraciones de Ca y Mg, lo que podría haber ocasionado competencia de absorción de K a nivel radical (Salgado-García *et al.*, 2010).

Cuadro 8. Contenido de potasio foliar (%) a los cuatro meses de edad, en 10 variedades de caña de azúcar con diferentes dosis de nitrógeno en el Ingenio Azsuremex.

Variedades	Dosis N (kg ha ⁻¹)			Media variedad†
	0	120	180	
COLPOSCTMEX 06-039	0.68	0.66	0.55	0.63ab
COLPOSCTMEX 06-271	0.81	0.82	0.73	0.79a
COLPOSCTMEX 06-474	0.62	0.56	0.70	0.62ab
COLPOSCTMEX 06-2362	0.55	0.57	0.41	0.51b
COLPOSCTMEX 05-223	0.85	0.82	0.74	0.80a
ATEMEX 96-40	0.68	0.67	0.58	0.64ab
RD 75-11	0.68	0.60	0.63	0.64ab
MEX 69-290	0.56	0.61	0.57	0.58b
MEX 68-P23	0.68	0.60	0.64	0.64ab
CP 72-1210	0.58	0.52	0.54	0.55b
Media dosis (N)†	0.67a	0.64a	0.61a	0.64
C.V (%)	18.7			
Prob. F:				
Dosis N (N)	0.15NS			
Variedades (V)	0.001**			
Interacción (NxV)	0.94NS			

†Medias con la misma literal dentro de la hilera o columna son iguales estadísticamente Tukey (P ≤ 0.05). NS: no significativo, ** Altamente significativo.

5.2. Unidades SPAD

Los resultados del ANOVA para la variable de unidades SPAD muestran diferencia altamente significativa para el efecto de variedad y no significativa para el efecto de dosis de N y la interacción NxV. El coeficiente de variación de 23.9 % indica alta variabilidad en la determinación de este parámetro (Cuadro 9).

La prueba de Tukey formó tres grupos con las 10 variedades de los cuales la COLPOSCTMEX 06-474 y COLPOSCTMEX 05-223 muestran los valores más altos de unidades SPAD con 31.2 y 27.9 respectivamente, la variedad MEX 69-290 obtuvo el menor valor con 18.4 unidades y el resto de las variedades forman otro grupo con valores intermedios que varían de 22.21 a 27.95 unidades SPAD; estos resultados son consistentes con lo observado en la India, en las variedades Coimbatore (Co), donde las lecturas SPAD fluctuaron de 33 a 14 unidades para Co 86032 y Co 87025, respectivamente (Radhamani *et al.*, 2015).

Así mismo, Córdova *et al.* (2010), no encontraron diferencias significativas en la actividad de clorofila con diferentes tratamientos de fertilización para el ciclo plantilla de la variedad MEX 79-431, por lo que sugirieron que la caña estaba bien nutrida en N, el valor promedio de la actividad de clorofila fue 27 SPAD. Por el contrario, Jaroenseng *et al.* (2010) determinaron que 34 unidades SPAD en hojas de caña de azúcar son consideradas como una concentración suficiente de nitrógeno y lecturas menores a 34 son consideradas como una concentración deficiente de nitrógeno para las variedades de caña de Tailandia

El coeficiente de correlación entre el contenido de N foliar y unidades SPAD fue de 0.05, el cual indica que estas variables no presentan relación entre sí ($P \leq 0.01$), coincidiendo con los resultados reportados por Wiedenfeld (1997), quien no encontró diferencia en unidades SPAD en hojas de caña de azúcar con aplicación de dosis crecientes de N y contrario a lo reportado por Jaroenseng *et al.* (2010), quienes demostraron que la concentración de nitrógeno en hojas de caña de azúcar se correlaciona con los valores SPAD.

Cuadro 9. Unidades SPAD a los cuatro meses de edad, en 10 variedades de caña de azúcar con diferentes dosis de nitrógeno en el Ingenio Azsuremex.

Variedades	Dosis N (kg ha ⁻¹)			Media variedad†
	0	120	180	
COLPOSCTMEX 06-039	25.6	26.5	21.4	24.5ab
COLPOSCTMEX 06-271	22.2	26.1	30.4	26.2ab
COLPOSCTMEX 06-474	30.1	32.2	31.4	31.2a
COLPOSCTMEX 06-2362	23.4	19.2	24.0	22.2ab
COLPOSCTMEX 05-223	23.8	28.7	31.3	27.9a
ATEMEX 96-40	28.2	30.3	24.6	27.7ab
RD 75-11	28.8	23.3	29.8	27.3ab
MEX 69-290	19.9	15.8	19.4	18.4b
MEX 68-P23	25.8	19.6	22.8	22.7ab
CP 72-1210	24.8	23.8	25.4	24.7ab
Media dosis (N)†	25.3a	24.6a	26.0a	25.3
C.V (%)	23.9			
Prob. F:				
Dosis N (N)	0.64NS			
Variedades (V)	0.003**			
Interacción (N*V)	0.8NS			

†Medias con la misma literal dentro de la hilera o columna son iguales estadísticamente Tukey ($P \leq 0.05$). NS: no significativo, * significativo.

5.3. Contenido de clorofila total ($\mu\text{g g}^{-1}$ peso seco)

Para el contenido de clorofila total en hojas de caña de azúcar a los cuatro meses de edad, de acuerdo con el ANOVA (Cuadro 10) existe diferencia altamente significativa para el efecto de variedades y no significativa para el efecto de dosis de N y la interacción NxV. El coeficiente de variación de 13.3 % se considera aceptable por tratarse de un experimento bajo condiciones de campo.

De acuerdo con la prueba de Tukey, la variedad COLPOSCTMEX 06-039 mostró el mayor contenido de clorofila total ($1523.5 \mu\text{g g}^{-1}$ peso seco); mientras que la variedad MEX 68-P23

obtuvo el valor más bajo. Los valores de clorofila encontrados en este estudio, superan a la media reportada de 0.649 mg g⁻¹ peso seco para las variedades Coimbatore, en la India (Radhamani *et al.*, 2015). Contrariamente a lo observado en este trabajo, Kumara y Bandara (2001) encontraron que la aplicación de fertilizante nitrogenado incrementó significativamente el contenido de clorofila foliar en caña de azúcar, el tratamiento sin aplicación de N redujo el contenido de clorofila en 10 % en comparación con el tratamiento con aplicación de 200 kg ha⁻¹ de N en el muestreo realizado 150 días después de la siembra.

Respecto al contenido de clorofila aun cuando se observó efecto de variedad, el orden de las variedades no coincidió con el de unidades SPAD. El coeficiente de correlación (r) entre ambas mediciones fue de 0.31 ($P \leq 0.01$), e indica baja asociación entre las variables, este valor es inferior al reportado por Jangpromma *et al.* (2010) quienes encontraron un $r=0.78$ en caña de azúcar bajo condiciones de invernadero. El coeficiente de correlación entre el contenido foliar de N y clorofila total fue de 0.18 ($P \leq 0.01$) lo cual indicaría que estas variables no están relacionadas entre sí. Contrariamente Patane y Vibhute (2014) mencionan que el contenido de clorofila y el nitrógeno foliar se correlacionan entre sí y que la estimación de alguna de ellas puede proporcionar el contenido de la otra.

Cuadro 10. Contenido de clorofila total ($\mu\text{g g}^{-1}$ peso seco) en hojas de 10 variedades de caña de azúcar de cuatro meses de edad con diferentes dosis de nitrógeno en el Ingenio Azsuremex.

Variedades	Dosis N (kg ha^{-1})			Media variedad†
	0	120	180	
COLPOSCTMEX 06-039	1432.1	1567.7	1585.3	1523.5a
COLPOSCTMEX 06-271	1135.1	1132.3	1210.5	1159.3bcd
COLPOSCTMEX 06-474	1376.4	1312.5	1285.3	1324.7ab
COLPOSCTMEX 06-2362	1177.3	962.3	903.4	1014.3cd
COLPOSCTMEX 05-223	1197.1	1632.4	1383.4	1404.3ab
ATEMEX 96-40	1396.3	1248.1	1304.9	1316.5ab
RD 75-11	1185.3	1222.6	1247.3	1218.4bc
MEX 69-290	914.1	1036.1	1129.0	1026.4cd
MEX 68-P23	869.3	1069.9	932.4	957.2d
CP 72-1210	1100.6	1303.5	1064.1	1156.0bcd
Media dosis (N)†	1178.4a	1237.8a	1204.6a	1206.5
C.V (%)	13.3			
Prob. F:				
Dosis N (N)	0.24NS			
Variedades (V)	0.0001**			
Interacción (NxV)	0.15NS			

†Medias con la misma literal dentro de la hilera o columna son iguales estadísticamente Tukey ($P \leq 0.05$). NS: no significativo, ** Altamente significativo.

5.4. Parámetros fisiológicos del cultivo de la caña de azúcar

5.4.1. Tasa fotosintética ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)

De acuerdo a los resultados del análisis de varianza no se observaron diferencias significativas para la tasa fotosintética (A) con respecto al efecto de la dosis de nitrógeno (N), pero sí para el efecto de variedades (V) y su interacción N x V (Cuadro 11). El coeficiente de variación de 25.8 % indica la alta variabilidad en la determinación de este parámetro. Estos resultados difieren a lo reportado por Kumara y Bandara (2001) quienes señalan que la aplicación de fertilizante nitrogenado incrementó significativamente la A en variedades de caña de azúcar irrigada una vez

cada 10 días hasta el 11^{avo} mes después de establecido el experimento. En este caso el tratamiento sin aplicación de N redujo la A 18 % en comparación con el tratamiento con aplicación de 200 kg ha⁻¹ de N en el muestreo realizado 150 días después de la siembra.

La prueba de Tukey indica que la variedad ATEMEX 96-40 presenta la A más alta (21.94 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) seguida de las variedades RD 75-11 (16.71 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) y COLPOSCTMEX 05-223 (17.21 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), las variedades que presentaron la A más baja son MEX 68-P23 (14.23 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) y MEX 69-290 (13.96 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$). Estos valores son similares a los reportados por Irvine (1975), quien señala que para 30 variedades australianas de caña de azúcar el valor de la tasa fotosintética fue de 16-24 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

Los valores de A detectados en las variedades estudiadas a los 150 días de edad son inferiores a los reportados por otros autores en cañas más jóvenes: Sage *et al.* (2014) para la variedad RB835486 (44 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), Ferreira *et al.* (2011) para 10 variedades brasileñas, Galon *et al.* (2009) para 6 variedades brasileñas: RB72454, RB835486, RB855113, RB867515, RB947520 y SP801816 (41.3-60.7), Inman-Bamber *et al.* (2008) para las variedades Q138 y Q183 (30.5 y 35.5 respectivamente) entre otros (Cuadro 2).

Se observó efecto de la interacción NxV para A indicando que la variedad tiene un efecto preponderante en esta interacción, dada la no significancia del efecto dosis de N (Cuadro 11). Este efecto de interacción dosis de NxV deberá de estudiarse a profundidad para adecuar las dosis de fertilización en las variedades de caña establecidas en los campos cañeros de Tabasco.

Cuadro 11. Tasa fotosintética ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) de cinco variedades de caña de azúcar a los 150 días de edad, con diferentes dosis de fertilizante nitrogenado en el Ingenio Azsuremex.

Variedades	Dosis N (kg ha^{-1})			Media variedad†
	0	120	180	
ATEMEX 96-40	23.1	21.6	19.8	21.9a
COLPOSCTMEX 05-223	16.9	15.2	19.3	17.2b
RD 75-11	15.5	18.3	16.2	16.7b
MEX 68-P23	13.8	14.9	13.9	14.2c
MEX 69-290	11.3	14.1	16.4	13.9c
Media dosis N†	16.1a	16.1a	17.1a	16.4
C.V (%)	25.8			
Prob. F:				
Dosis N (N)	0.14NS			
Variedad (V)	0.001**			
Interacción N*V	0.001**			

†Medias con la misma literal dentro de la hilera o columna son iguales estadísticamente Tukey ($P \leq 0.05$). NS: no significativo, ** Altamente significativo.

5.4.2. Conductancia estomática ($\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)

Para la conductancia estomática (g_s) a los 150 días de edad de la caña de azúcar, el ANOVA muestra diferencia altamente significativa para el efecto de la dosis de nitrógeno (N), variedades (V) y la interacción NxV. El coeficiente de variación de 28.2 % muestra alta variabilidad en la determinación de este parámetro.

La prueba de Tukey indica que con las dosis 120 y 180 kg ha^{-1} de N se presentó la g_s más alta ($0.22 \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$). La falta de N redujo la g_s en un 18 % en comparación con la dosis 120 kg N ha^{-1} .

Las variedades fueron agrupadas de la siguiente manera: ATEMEX 96-40 fue la variedad que mostró el valor más alto ($0.27 \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) para esta variable, las variedades

COLPOSCTMEX 05-223 y RD 75-11 mostraron valores intermedios, MEX 68-P23 y MEX 69-290 ($0.17 \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) fueron las variedades que mostraron los valores más bajos. El rango de variación de g_s en las cinco variedades evaluadas fue de 0.17 a $0.27 \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, y son similares a los observados bajo condiciones de temporal en ocho variedades de caña de azúcar (0.18 a $0.29 \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), a los 159 días después de la siembra (De Silva y De Costa 2009). Si se comparan con los valores de g_s observados por Ferreira *et al.* (2011) en 10 variedades brasileñas de caña de azúcar son bajos (0.19 - $0.50 \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$). Por el contrario, Marchiori *et al.* (2010), durante el curso diurno encontró que el intercambio de gases de la hoja (A) y la conductancia estomática (g_s), fueron similares en las variedades IACSP93-2060, IACSP95-3028 y IACSP95-5000, con A variando de 13 a $15.5 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ y g_s de 0.09 a $0.11 \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

Con respecto a la interacción NxV se observa que las variedades ATEMEX 96-40, RD 75-11 y MEX 68-P23 obtuvieron la mayor g_s con 120 kg ha^{-1} de N mientras que la COLPOSCTMEX 05-223 presentó el valor más alto para esta variable con la dosis 180 kg ha^{-1} de N, la variedad MEX 69-290 alcanzó el valor más bajo con el tratamiento sin aplicación de N y aumentó conforme se incrementó la dosis de N, lo cual podría indicar que la g_s de las variedades depende de la nutrición N, pero también de la densidad estomática y del estado hídrico de la variedad, entre otros (Cuadro 12).

Cuadro 12. Conductancia estomática ($\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$) de cinco variedades de caña de azúcar a los 150 días de edad con diferentes dosis de fertilizante nitrogenado en el Ingenio Azsuremex.

Variedades	Dosis N (kg ha^{-1})			Media variedad†
	0	120	180	
ATEMEX 96-40	0.26	0.28	0.25	0.27a
COLPOSCTMEX 05-223	0.20	0.20	0.25	0.22b
RD 75-11	0.18	0.24	0.22	0.21b
MEX 68-P23	0.15	0.19	0.18	0.17c
MEX 69-290	0.13	0.17	0.20	0.17c
Media dosis N†	0.18b	0.22a	0.22a	0.21
C.V (%)	28.2			
Prob. F:				
Dosis N (N)	0.001**			
Variedad (V)	0.001**			
Interacción. NxV	0.002**			

†Medias con la misma literal dentro de la hilera o columna son iguales estadísticamente Tukey ($P \leq 0.05$). ** Altamente significativo.

5.4.3. Concentración interna de CO_2 ($\mu\text{mol CO}_2 \text{mol}^{-1}$)

Los resultados del análisis de varianza muestran diferencia altamente significativa para la concentración interna de CO_2 (C_i) a los 150 días de edad, con respecto a las dosis de N, las variedades (V), así como para la interacción NxV (Cuadro 13). El coeficiente de variación de 16.5 % se considera aceptable. La no aplicación de N redujo la C_i en 11.2 % en comparación con la dosis 180 kg ha^{-1} de N.

La prueba de Tukey indica que las dosis de N con las que se obtuvieron los valores más altos para C_i fueron 120 y 180 kg ha^{-1} de N y con la dosis 0 kg ha^{-1} de N se obtuvo la C_i más baja. Esto sugiere que la concentración interna de CO_2 está asociada a la apertura estomática y al consumo del mismo para fotosíntesis. Aparentemente las variedades con mayor conductancia estomática,

almacenaron más C_i aún con un incremento en A. Con respecto a las variedades la MEX 69-290 fue la que alcanzó el valor más alto para esta variable, mientras que ATEMEX 96-40 fue la que presentó el valor más bajo; las demás forman un grupo con valores intermedios. Los valores obtenidos para este parámetro en este estudio son inferiores a los reportados por Ferreira *et al.* (2011) para 10 variedades brasileñas de caña de azúcar, que varían de 38.3-220.7 $\mu\text{mol CO}_2$. Asimismo Bunce (2005), observó en dos especies C_4 (*Z. mays* y *A. hypochondriacus*) que al aumentar la cantidad de N aplicado, la C_i disminuyó, lo cual es contrario a lo observado en este experimento donde la interacción NxV fue significativa.

En la interacción NxV se observa que la C_i de las variedades MEX 68-P23, RD 75-11 y ATEMEX 96-40 fue más baja con el tratamiento sin aplicación de N y se observó un aumento conforme se aumentó la dosis de N, la variedad MEX 69-290 obtuvo el valor más alto en el tratamiento testigo y el más bajo con la dosis 120 kg ha^{-1} de N. La variedad COLPOSCTMEX 05-223 alcanzó la C_i más baja cuando no se le aplicó nitrógeno y la más alta con 120 kg ha^{-1} de N, pero con 180 kg ha^{-1} de N descendió nuevamente.

5.4.4. Tasa de transpiración ($\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$)

La tasa de transpiración (E) de las variedades de caña de azúcar a los 150 días de edad fue afectada por la aplicación de las dosis de nitrógeno ya que los resultados del ANOVA muestran diferencia altamente significativa para el efecto de dosis de N, variedad y la interacción NxV (Cuadro 14). El coeficiente de variación de 18.5 % se considera aceptable.

Cuadro 13. Concentración interna de CO₂ (μmol CO₂) de cinco variedades de caña de azúcar de 150 días de edad con diferentes dosis de fertilizante nitrogenado en el Ingenio Azsuremex.

Variedades	Dosis N (kg ha ⁻¹)			Media variedad†
	0	120	180	
ATEMEX 96-40	76.4	87.6	97.3	87.1b
COLPOSCTMEX 05-223	81.5	103.1	86.7	90.4ab
RD 75-11	80.1	91.6	103.2	91.7ab
MEX 68-P23	86.1	94.5	98.1	92.9ab
MEX 69-290	98.6	90.6	91.1	93.4a
Media dosis N†	84.5b	93.5a	95.32a	91.1
C.V (%)	16.5			
Prob. F:				
Dosis N (N)	0.001**			
Variedad (V)	0.003**			
Interacción NxV	0.001**			

†Medias con la misma literal dentro de la hilera o columna son iguales estadísticamente Tukey (P ≤ 0.05). ** Altamente significativo.

No se observó diferencia significativa entre las dosis 0 y 120 kg ha⁻¹ de N, pero la dosis 180 kg ha⁻¹ de N redujo E en un 15 % con respecto a la dosis baja de N. El rango de variación para E entre las variedades en estudio fue de 5.05 a 7.37 mmol H₂O m⁻² s⁻¹ y son superiores a los valores reportados por Ferreira *et al.* (2011) para 10 variedades brasileñas de caña de azúcar (2.8 y 5.8 mmol H₂O m⁻² s⁻¹) y De Silva y De Costa (2009) para 8 variedades de caña de azúcar bajo condiciones de temporal (1.4 a 2.1 mmol H₂O m⁻² s⁻¹) y similares para los valores obtenidos por estas mismas variedades bajo condiciones de riego (3.7-6.0 mmol H₂O m⁻² s⁻¹) reportados por De Silva y De Costa (2009).

Con respecto al factor variedad, la prueba de Tukey formó tres grupos, el primero lo conforma la ATEMEX 96-40 como la variedad con la E más alta, mientras que la MEX 68-P23 y la MEX

69-290 forman el grupo con la menor E y las demás variedades representan un grupo con valores intermedios.

En la interacción NxV se observa que las variedades ATEMEX 96-40 y MEX 68-P23 alcanzaron la E más alta con el tratamiento testigo y descendió conforme se aumentó la dosis de nitrógeno, mientras que la MEX 69-290 y RD 75-11 obtuvieron la menor E con la dosis baja de N, la más alta con 120 kg ha⁻¹ de N y disminuyó nuevamente con la dosis alta. La variedad COLPOSCTMEX 05-223 mostró la menor y mayor tasa de transpiración con 120 y 180 kg ha⁻¹ de N respectivamente (Cuadro 14).

Cuadro 14. Tasa de transpiración (mmol H₂O m⁻² s⁻¹) de cinco variedades de caña de azúcar de 150 días de edad con diferentes dosis de fertilizante nitrogenado en el Ingenio Azsuremex.

Variedades	Dosis N (kg ha ⁻¹)			Media variedad
	0	120	180	
ATEMEX 96-40	8.5	7.8	5.7	7.3a
COLPOSCTMEX 05-223	6.2	6.1	6.4	6.3b
RD 75-11	6.1	6.7	4.7	5.9b
MEX 68-P23	5.6	5.6	4.7	5.3c
MEX 69-290	4.8	5.3	4.9	5.0c
Media dosis N	6.3a	6.3a	5.3b	6.0
C.V (%)	18.5			
Prob. F:				
Dosis N (N)	0.001**			
Variedad (V)	0.001**			
Interacción N*V	0.001**			

†Medias con la misma literal dentro de la hilera o columna son iguales estadísticamente Tukey (P ≤ 0.05). ** Altamente significativo.

5.4.5. Eficiencia instantánea en el uso del agua

La relación entre la A y la E representa la eficiencia instantánea del uso del agua (Endres *et al.*, 2010). Se observó que ATEMEX 96-40 fue más eficiente en el uso del agua que las otras

variedades, ya que produjo 3 $\mu\text{mol CO}_2$ fijado por cada $\text{mmol H}_2\text{O}$ gastado en transpiración, seguida de RD 75-11 y MEX 69-290. Las menos eficientes fueron MEX 68 P23 y COLPOSCTMEX 05-223 (Cuadro 15).

La eficiencia instantánea en el uso del agua en las cinco variedades varió de 2.7-3.0 $\mu\text{mol CO}_2/\text{mmol H}_2\text{O}$ y se considera baja en comparación con 4.4 $\mu\text{mol CO}_2/\text{mmol H}_2\text{O}$ reportados por Endres *et al.* (2010) para las variedades RB72545, SP79-1011 y RB92579, en São Luiz de Quitunde, Brasil.

Cuadro 15. Eficiencia instantánea en el uso del agua ($\mu\text{mol CO}_2/\text{mmol H}_2\text{O}$) de cinco variedades de caña de azúcar de 150 días de edad con diferentes dosis de fertilizante nitrogenado en el Ingenio Azsuremex.

Variedades	Dosis N (kg ha^{-1})			Media variedad
	0	120	180	
MEX 69-290	2.4	2.7	3.3	2.8
MEX 68-P23	2.5	2.7	3.0	2.7
RD 75-11	2.5	2.7	3.4	2.8
COLPOSCTMEX 05-223	2.7	2.5	3.0	2.7
ATEMEX 96-40	2.7	2.8	3.5	3.0
Media dosis N	2.6	2.6	3.2	2.7

5.5. Parámetros fisiológicos de tres variedades de caña de azúcar en respuesta a la radiación fotosintéticamente activa (PAR).

Previo a la determinación de algunos parámetros fisiológicos (A , g_s , C_i y E), se realizaron las curvas de respuesta a la luz en las variedades ATEMEX 96-40, COLPOSCTMEX 05-223 y RD 75-11 bajo la dosis de 180 kg ha^{-1} de N, la cual consideramos una dosis donde no habría deficiencia por este nutriente. Se observa que en todas las variedades la A máxima se alcanza a

partir de los $1000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (Figura 1), resultados similares obtuvieron Zhao *et al.* (2013) en las variedades CP 01-2390 y CP 80-1743 con y sin aplicación de riego.

Las variedades ATEMEX 96-40 y COLPOSCTMEX 05-223 presentaron mayor A y E en comparación con la RD 75-11 (Figura 1A y 1D). La concentración de CO_2 intracelular (C_i) de las tres variedades presenta una relación inversamente proporcional con la radiación fotosintéticamente activa (PAR), es decir; a mayor PAR menor C_i y a menor PAR mayor C_i (Figura 1C), relacionada al consumo de CO_2 para fotosíntesis. Las diferencias varietales observadas pudieran deberse a la arquitectura de la planta, donde aquellas que presentaron menor A con alta PAR pudieron tener mayor número de hojas sombreadas. Marchiori *et al.* (2010), al evaluar la respuesta a la disponibilidad de luz a tres niveles del dosel de diferentes variedades de caña de azúcar observaron que la variedad IACSP95-3028 cuyo dosel superior presentaba una alta exposición a la disponibilidad de luz incrementó la tasa de fotosíntesis y mejoró el crecimiento vegetativo al incrementarse el macollamiento, área foliar y la acumulación de biomasa en hojas y tallos.

La tasa de transpiración (E) de las tres variedades tuvo un comportamiento similar hasta $1500 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, después de este valor, la E de la variedad RD 75-11 mostró una ligera disminución, mientras que la de las variedades ATEMEX 96-40 y COLPOSCTMEX 05-223 continuó incrementándose. La variedad ATEMEX 96-40 presentó la E más alta y la RD 75-11 la más baja (Figura 1D), semejante a lo observado cuando se midió E en hojas individuales a una PAR de $1500 \mu\text{moles CO}_2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$.

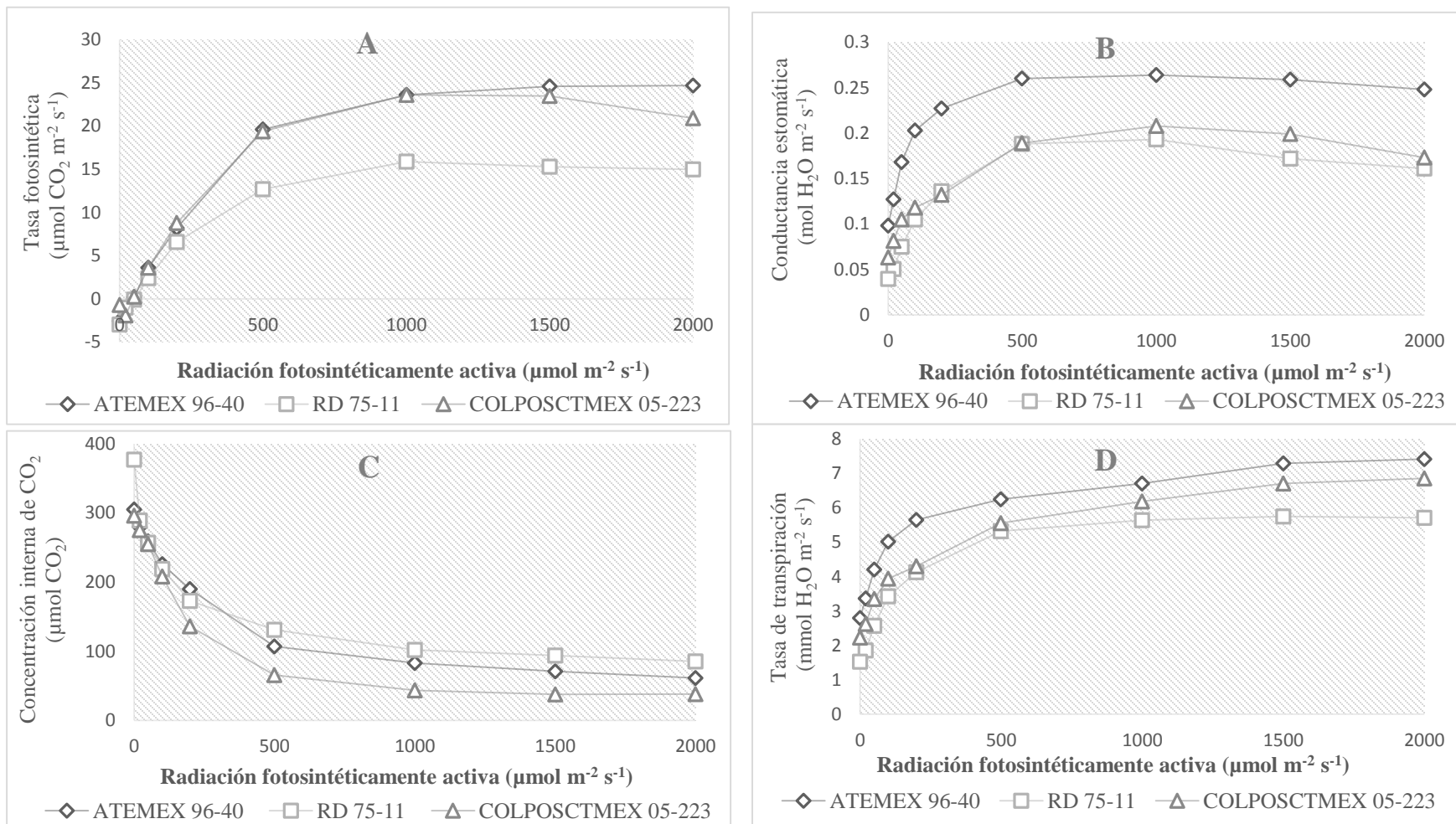
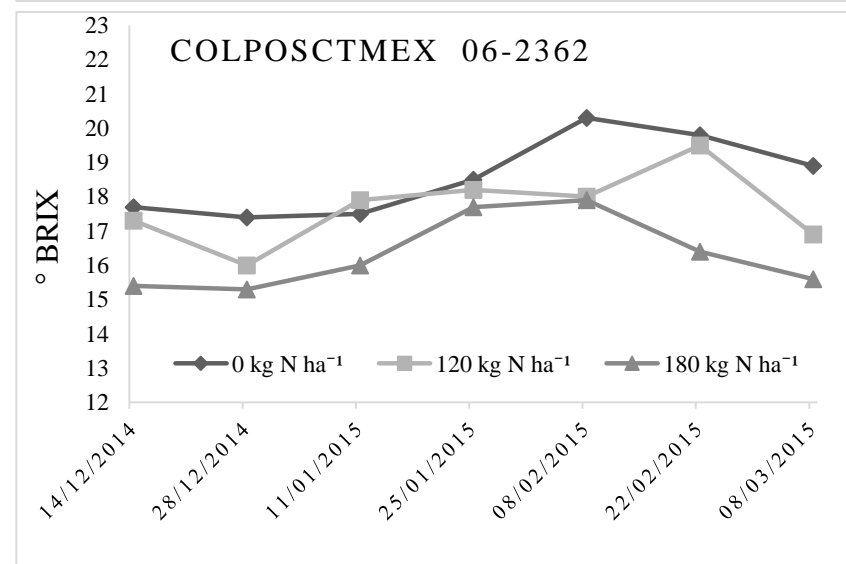
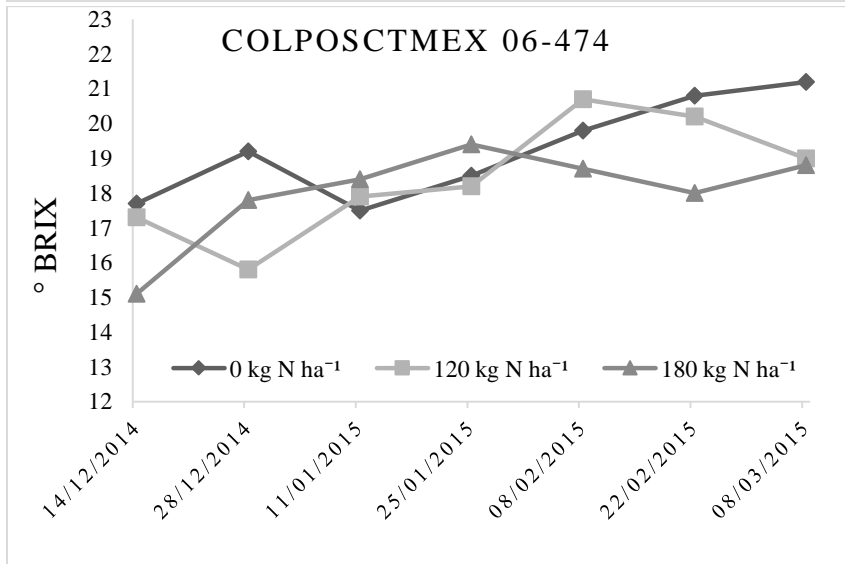
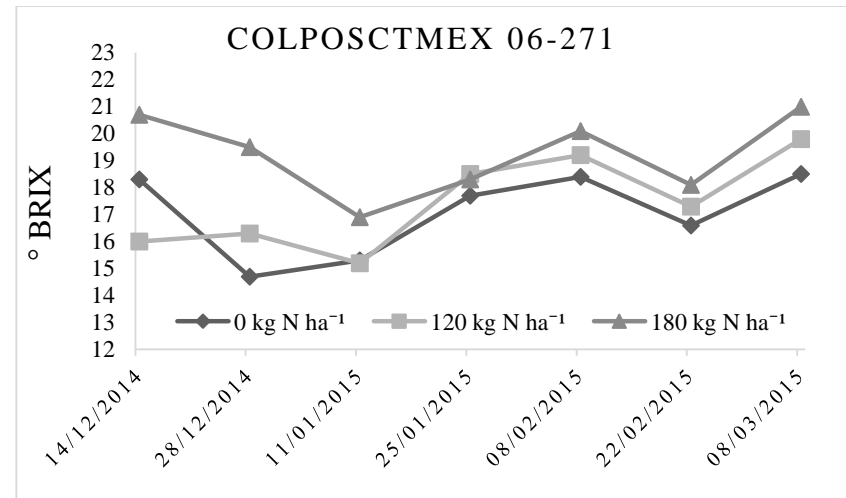
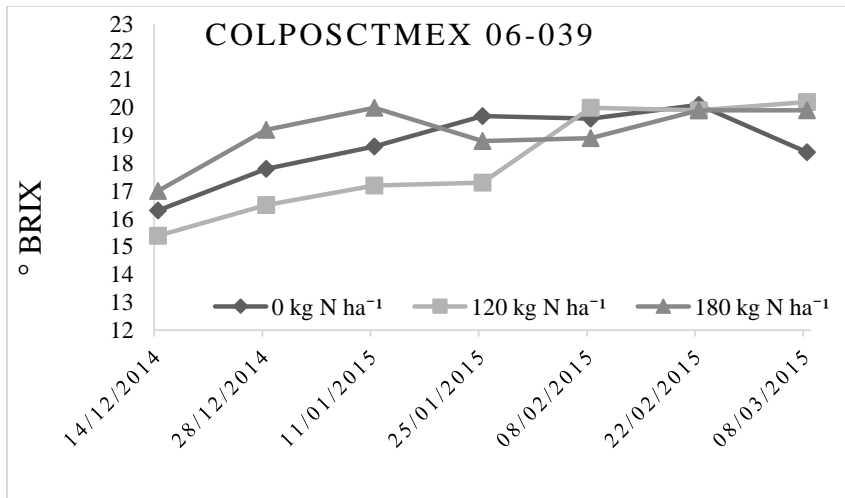


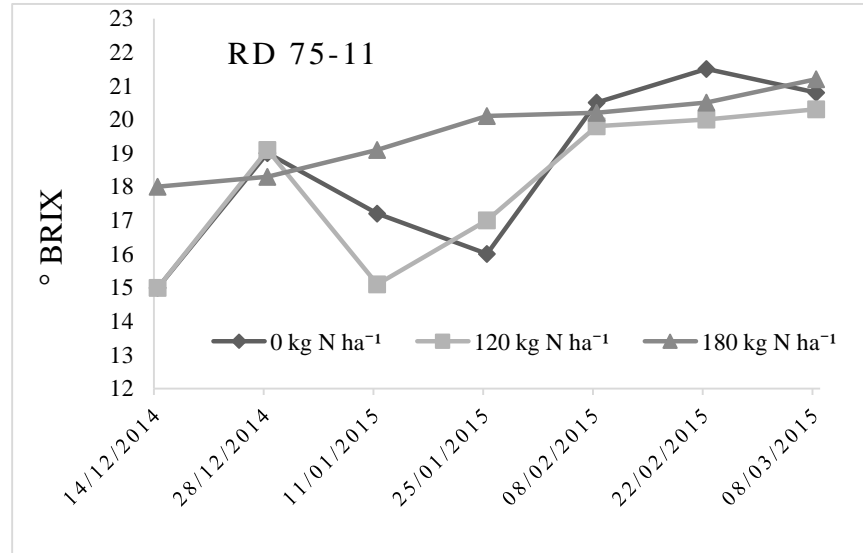
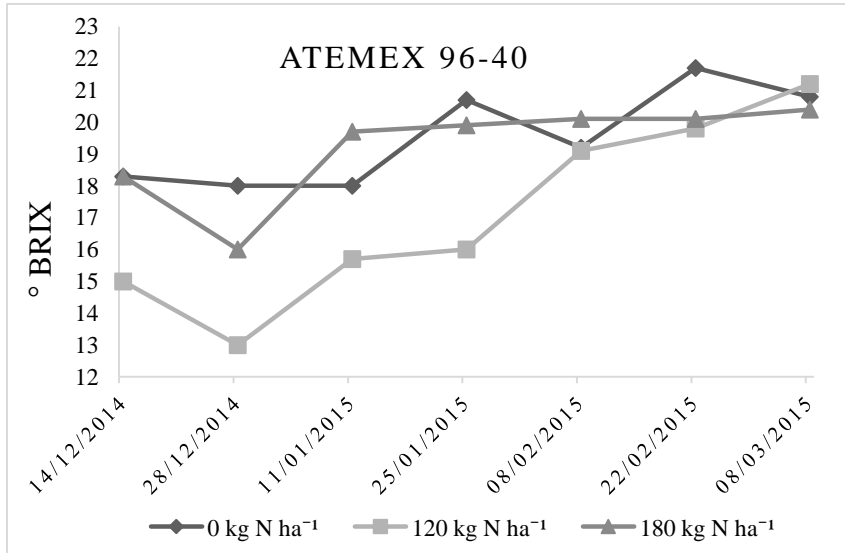
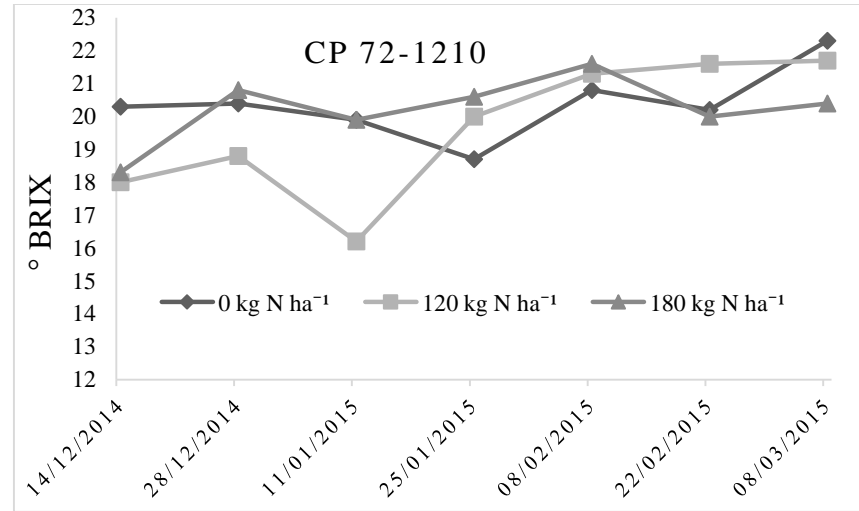
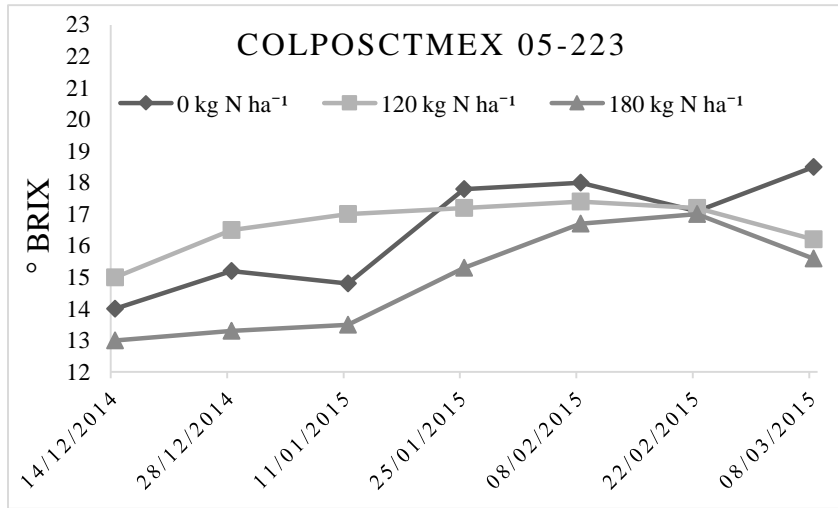
Figura 1. Parámetros fisiológicos de tres variedades de caña de azúcar en respuesta a la radiación fotosintéticamente activa (PAR).

A. Tasa fotosintética, B. Conductancia estomática, C. Concentración interna de CO_2 y D. Tasa de transpiración.

5.6. Seguimiento de madurez de variedades de caña de azúcar

De acuerdo a los resultados de los muestreos de grados Brix, la variedad COLPOSCTMEX 06-271 se clasificó como de madurez temprana, porque los valores más altos para ésta variable los presentó de diciembre a enero, aunque los grados Brix mostraron un comportamiento muy dinámico. Esto no concuerda con lo descrito en su ficha técnica, donde es considerada de madurez media. Las variedades restantes con base en los resultados de Brix, se consideran de madurez media y coincide con lo descrito en su ficha técnica, mostrando los valores más altos para esta variable en los meses febrero-marzo (Figura 2).





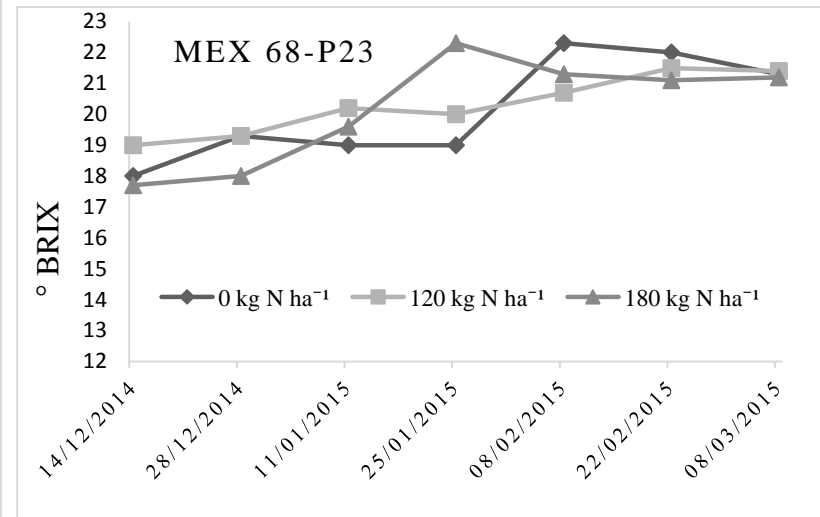
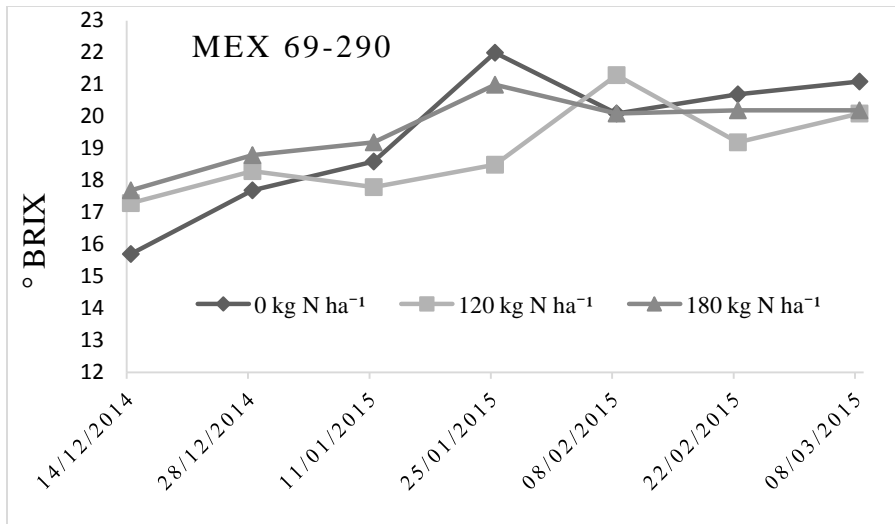


Figura 2. Seguimiento de madurez de diez variedades de caña de azúcar con diferentes dosis de nitrógeno.

5.7. Calidad de jugo de las variedades de caña de azúcar

Para estas variables no se realizó el ANOVA debido a que se solo se analizó una repetición, porque el laboratorio de campo del IA no funcionó durante la zafra 2014/2015, dichas muestras fueron trasladadas al laboratorio de campo de Ingenio presidente Benito Juárez (IPBJ).

Los valores de referencia de los parámetros de la calidad del jugo de la caña de azúcar en México son: sacarosa y Pol de 12.5 %, grados Brix de 18-22 %, pureza de 79 al 89 %, fibra de 11 al 15 %, humedad de 73 -75 % y azúcares reductores cercanos a cero (Salgado *et al.*, 2003a).

Con la dosis de 0 kg ha⁻¹ de N, la variedad MEX 69-290 presentó los valores más altos de sacarosa y Pol, 17.43 y 20.3 % respectivamente y los más bajos en cuanto a fibra y azúcares reductores (Cuadro 16); sin embargo con la dosis de 180 kg ha⁻¹ de N esta variedad obtuvo un contenido adecuado para estas variables (15.99 y 18.58 %), lo cual, indicaría que la calidad de jugo de esta variedad no se ve afectada negativamente con dosis altas de N, esto coincide con lo reportado por Salgado *et al.* (2003a) para esta variedad y la MEX 68-P23, señalando que la calidad de jugo de estas variedades no fue afectada por la aplicación de diferentes tratamientos de fertilización nitrogenada.

Con la dosis de 0 kg ha⁻¹ de N, las variedades COLPOSCTMEX 06-474, COLPOSCTMEX 06-2362 y CP 72-1210, fueron las únicas que no superaron el valor de referencia de calidad de jugo en cuanto a sacarosa, lo cual indica que con dicho tratamiento, estas variedades aun no completaban su madurez al momento de la cosecha. Con la dosis de 120 kg ha⁻¹ de N las 10 variedades superaron los valores de referencia de los parámetros de calidad de jugo (Cuadro 17). El contenido de sacarosa y Pol en las variedades COLPOSCTMEX 06-271 y CP 72-1210 con

180 kg ha⁻¹ de N disminuyó (Cuadro 18), en comparación con las dosis 0 y 120 kg ha⁻¹ de N, lo cual confirma que dosis altas de N afectan negativamente la calidad del jugo.

Cuadro 16. Calidad de jugo de 10 variedades de caña de azúcar con 0 kg ha⁻¹ de nitrógeno.

Variedad	Calidad de jugo (%)				
	Brix	Sacarosa	Pol	A. Reductores	Fibra
COLPOSCTMEX 06-039	16.81	14.19	16.50	0.414	13.73
COLPOSCTMEX 06-271	14.80	13.10	15.20	0.437	13.73
COLPOSCTMEX 06-474	11.78	10.42	12.04	0.562	13.55
COLPOSCTMEX 06-2362	10.75	10.05	11.62	0.544	14.00
COLPOSCTMEX 05-223	14.79	13.80	16.02	0.424	13.83
ATEMEX 96-40	15.49	14.35	16.64	0.327	13.18
RD 75-11	16.48	13.64	15.86	0.518	13.70
MEX 69-290	19.54	17.43	20.30	0.263	13.08
MEX 68-P23	17.30	15.80	18.20	0.336	14.00
CP 72-1210	14.80	12.43	14.42	0.545	13.75

Cuadro 17. Calidad de jugo de 10 variedades de caña de azúcar con aplicación de 120 kg ha⁻¹ de nitrógeno.

Variedad	Calidad de jugo (%)				
	Brix	Sacarosa	Pol	A. Reductores	Fibra
COLPOSCTMEX 06-039	14.80	13.15	15.26	0.437	13.68
COLPOSCTMEX 06-271	16.47	14.81	17.22	0.350	13.83
COLPOSCTMEX 06-474	14.11	12.62	14.64	0.487	13.98
COLPOSCTMEX 06-2362	14.48	13.54	15.68	0.438	13.33
COLPOSCTMEX 05-223	15.80	14.63	17.00	0.373	13.75
ATEMEX 96-40	16.49	14.08	16.36	0.437	13.50
RD 75-11	15.46	13.22	15.36	0.437	13.83
MEX 69-290	14.80	13.79	16.00	0.427	13.75
MEX 68-P23	17.81	16.65	19.40	0.373	14.00
CP 72-1210	17.15	15.13	17.60	0.366	13.78

Cuadro 18. Calidad de jugo de 10 variedades de caña de azúcar con aplicación de 180 kg ha⁻¹ de nitrógeno.

Variedad	Calidad de jugo (%)				
	Brix	Sacarosa	Pol	A. Reductores	Fibra
COLPOSCTMEX 06-039	16.13	13.90	16.16	0.467	13.88
COLPOSCTMEX 06-271	12.78	10.92	12.64	0.424	13.70
COLPOSCTMEX 06-474	15.46	13.34	15.50	0.524	13.9
COLPOSCTMEX 06-2362	16.13	14.79	17.20	0.517	13.98
COLPOSCTMEX 05-223	14.79	13.20	15.32	0.403	13.80
ATEMEX 96-40	15.80	14.63	17.00	0.296	13.80
RD 75-11	18.53	16.76	19.50	0.253	13.15
MEX 69-290	17.86	15.99	18.58	0.367	13.10
MEX 68-P23	16.8	14.95	17.40	0.299	13.98
CP 72-1210	12.11	10.79	12.48	0.518	13.60

5.8. Rendimiento de caña (t ha⁻¹)

Se observó diferencias altamente significativas para el rendimiento de caña con respecto a las dosis de nitrógeno (N), variedad (V) y la interacción NxV. El coeficiente de variación de 7.9 % indica alta precisión en la determinación de este parámetro.

Las variedades de caña incrementaron el rendimiento conforme aumentó la dosis de N. De acuerdo con la prueba de Tukey las variedades COLPOSCTMEX 05-223 y RD 75-11, presentaron el rendimiento más alto y las variedades MEX 69-290 y COLPOSCTMEX 06-271 presentaron el rendimiento más bajo (Cuadro 19).

El rendimiento de las 10 variedades osciló entre 84.1 y 128.0 t ha⁻¹, y se considera alto en comparación con el rendimiento promedio de 51.5 t ha⁻¹ del área de abastecimiento del IA (Cañeros, 2015). También es similar a los reportados por Salgado *et al.* (2008), 63.5-93.0 t ha⁻¹ y Palma-López *et al.* (2002) con valores de 71.1-123.2 t ha⁻¹, en distintas unidades de suelo, lo cual indicaría que la fertilización nitrogenada afectó positivamente el rendimiento de las variedades

evaluadas y por lo tanto constituye una práctica necesaria en el área de estudio si lo que se requiere es elevar el rendimiento del cultivo.

Con respecto a la interacción NxV, 9 de las 10 variedades en estudio presentaron el rendimiento más alto con la con la dosis de 180 kg ha⁻¹ de N, contrariamente MEX 69-290 mostró mayor rendimiento con 120 kg ha⁻¹ de N. Las variedades COLPOSCTMEX 06-039 y MEX 69-290 no mostraron un incremento lineal del rendimiento de acuerdo con el aumento en la dosis de N aplicada (Cuadro 19), estos resultados son similares a los obtenidos por Fortes *et al.* (2013), quienes concluyeron que la fertilización nitrogenada promovió aumentos en el rendimiento durante el ciclo plantilla y socas 1-3, así como en el acumulado de los 4 ciclos de cultivo.

5.9. Rendimiento de materia seca

5.9.1. Rendimiento de materia seca en paja (RMSP)

El ANOVA para el rendimiento de materia seca de la paja (RMSP), muestra diferencia altamente significativa con respecto a la dosis de nitrógeno (N) y la variedad (V) y no significativa con respecto a la interacción NxV (Cuadro 20).

De acuerdo con la prueba de Tukey, la dosis 180 kg ha⁻¹ de N fue con la que se obtuvo el mayor RMSP; mientras que con 120 y 0 kg ha⁻¹ de N fueron iguales estadísticamente.

Cuadro 19. Rendimiento de caña (t ha⁻¹) de 10 variedades de caña de azúcar con diferentes dosis de nitrógeno en el Ingenio Azsuremex.

Variedades	Dosis N (kg ha ⁻¹)			Media variedad†
	0	120	180	
COLPOSCTMEX 06-039	95.0	92.3	123.3	103.5cd
COLPOSCTMEX 06-271	82.8	86.5	91.2	86.8ef
COLPOSCTMEX 06-474	101.3	109.1	120.6	110.3bcd
COLPOSCTMEX 06-2362	93.6	100.3	112.8	102.2cd
COLPOS CTMEX 05-223	104.3	126.9	153.0	128.0a
ATEMEX 96-40	101.8	111.9	121.9	111.9bc
RD 75-11	101.5	124.2	133.3	119.7ab
MEX 69-290	70.7	93.2	88.2	84.1f
MEX 68-P23	103.0	108.7	129.2	113.6bc
CP 72-1210	85.3	101.1	106.2	97.5de
Media dosis (N) †	93.9c	105.4b	118.0a	105.8
C.V (%)	7.9			
Prob. F:				
Dosis N (N)	0.001**			
Variedades (V)	0.001**			
Interacción (NxV)	0.001**			

†Medias con la misma literal dentro de la hilera o columna son iguales estadísticamente Tukey (P ≤ 0.05). ** Altamente significativo.

La variedad ATEMEX 96-40 presentó el RMSP más alto, la COLPOSCTMEX 06-039 el más bajo y las demás variedades formaron un grupo con valores intermedios para esta variable (Cuadro 20). El RMSP promedio de las 10 variedades en estudio fue de 14.8 t ha⁻¹ (con un rango de variación de 12.1-20.4 t ha⁻¹). Este rango coincide con algunas estimaciones de paja quedada en campo después de la cosecha mecanizada sin quema en Piracicaba Sao Paulo Brasil, cuyos valores fluctúan de 10 a 20 t ha⁻¹ de paja (Franco *et al.*, 2008b y 2011; Fortes *et al.*, 2011; y Vieira-Megda *et al.*, 2015); y para el Ingenio Pdte. Benito Juárez, donde se reportó un rango de

12.7 a 22.3 t ha⁻¹ (Salgado *et al.*, 2014); y son mayores a las estimaciones obtenidas en el ingenio Azsuremex por Salgado *et al.* (2008), donde el rango varía de 6.7 a 9.8 t ha⁻¹ de materia seca.

Cuadro 20. Rendimiento de materia seca de la paja (t ha⁻¹) de 10 variedades de caña de azúcar con diferentes dosis de nitrógeno en el Ingenio Azsuremex.

Variedades	Dosis N (kg ha ⁻¹)			Media variedad†
	0	120	180	
COLPOSCTMEX 06-039	14.2	9.8	12.2	12.1b
COLPOSCTMEX 06-271	9.7	12.9	16.4	13.0b
COLPOSCTMEX 06-474	19.6	10.8	18.1	16.2ab
COLPOSCTMEX 06-2362	10.4	13.6	21.8	15.3ab
COLPOSCTMEX 05-223	14.5	12.1	18.7	15.1ab
ATEMEX 96-40	19.6	23.3	18.3	20.4a
RD 75-11	14.3	13.6	18.8	15.5ab
MEX 69-290	12.9	15.1	12.1	13.3b
MEX 68-P23	8.7	11.6	16.9	12.4b
CP 72-1210	14.6	14.3	15.0	14.6ab
Media dosis (N) †	13.8b	13.7b	16.8a	14.8
C.V (%)	29.3			
Prob. F:				
Dosis N (N)	0.010**			
Variedades (V)	0.009**			
Interacción (NxV)	0.1NS			

†Medias con la misma literal dentro de la hilera o columna son iguales estadísticamente Tukey ($P \leq 0.05$). NS: no significativo, ** Altamente significativo.

5.9.2. Rendimiento de materia seca de tallos (RMST)

De acuerdo con el ANOVA para RMST, se encontró diferencia altamente significativa con respecto a la dosis de nitrógeno (N), variedades (V) y la interacción NxV (Cuadro 21).

La prueba de Tukey indica que con la dosis 180 kg ha⁻¹ de N se obtuvo el valor más alto para el RMST y fue igual estadísticamente entre 0 y 120 kg ha⁻¹ de N. La variedad que obtuvo el mayor RMST fue COLPOSCTMEX 05-223 con 38.9 t ha⁻¹ coincidiendo con lo encontrado para la variable rendimiento (t ha⁻¹) ya que esta variedad fue la que obtuvo también el mayor

rendimiento de caña, COLPOSCTMEX 06-474 fue la variedad que presentó el menor RMST con 29.3 t ha⁻¹; mientras el resto de las variedades formaron un grupo con valores similares entre ellas que varían de 30.5 a 37.9 t ha⁻¹.

Con respecto a la interacción NxV; se observa que en las variedades COLPOSCTMEX 06-271, COLPOSCTMEX 06-2362 y MEX 68-P23 el RMST aumentó conforme se incrementó la dosis de N aplicada; mientras que en las variedades ATEMEX 96-40, MEX 69-290 y CP 72-1210, el RMST solo incrementó con la dosis de 120 kg ha⁻¹ de N y descendió nuevamente con la dosis 180 kg ha⁻¹ de N, la COLPOSCTMEX 06-474 presentó el mayor RMST en el tratamiento sin aplicación de N y las variedades COLPOSCTMEX 06-039, COLPOSCTMEX 05-223 y RD 75-11 obtuvieron el mayor y menor RMST con la dosis 180 y 120 kg ha⁻¹ de N respectivamente.

En general los valores de RMST de las diez variedades oscilaron entre 29.3 y 39.8 t ha⁻¹, dichos valores son altos en comparación con los reportados por Salgado *et al.*, (2008), en distintas subunidades de suelo para el área de abastecimiento del Ingenio Azsuremex, aunque cabe señalar que los rendimientos (t ha⁻¹) reportados por estos investigadores son bajos en comparación con los obtenidos en este experimento en ciclo plantilla.

5.9.3. Rendimiento de materia seca total de las variedades (RMSTo)

El ANOVA para el RMSTo (paja + tallo) de las variedades de caña de azúcar muestra diferencia altamente significativa con respecto a las dosis de nitrógeno (N), variedades (V) y la interacción NxV. El coeficiente de variación fue de 13.4 % e indica que hubo precisión en la determinación de esta variable (Cuadro 22).

De acuerdo con la prueba de Tukey, con la dosis de 180 kg ha⁻¹ de N se obtuvo el mayor RMSTo y en las dosis 0 y 120 kg ha⁻¹ de N, el RMSTo fue similar estadísticamente.

Cuadro 21. Rendimiento de materia seca de tallos ($t\ ha^{-1}$) de 10 variedades de caña de azúcar con diferentes dosis de nitrógeno en el Ingenio Azsuremex.

Variedades	Dosis N ($kg\ ha^{-1}$)			Media variedad†
	0	120	180	
COLPOSCTMEX 06-039	30.7	27.8	33.1	30.5bc
COLPOSCTMEX 06-271	30.3	30.7	38.3	33.1abc
COLPOSCTMEX 06-474	31.7	26.9	29.3	29.3c
COLPOSCTMEX 06-2362	29.7	35.3	41.9	35.6abc
COLPOSCTMEX 05-223	40.5	31.1	45	38.9a
ATEMEX 96-40	31.7	40.9	38.8	37.1abc
RD 75-11	35.8	34.3	42.9	37.9ab
MEX 69-290	35.8	41.5	29.2	35.5abc
MEX 68-P23	23.1	31.1	40.7	31.6abc
CP 72-1210	30.6	36.9	33.4	33.6abc
Media dosis (N) †	31.8b	33.6b	37.2a	34.3
C.V (%)	15.3			
Prob. F:				
Dosis N (N)	0.001**			
Variedades (V)	0.002**			
Interacción (NxV)	0.003**			

†Medias con la misma literal dentro de la hilera o columna son iguales estadísticamente Tukey ($P \leq 0.05$). ** Altamente significativo.

La variedad ATEMEX 96-40 presentó el mayor RMSTo, seguida de las variedades COLPOSCTMEX 05-223 y RD75-11; mientras que la COLPOSCTMEX 06-039 obtuvo el RMSTo más bajo (Cuadro 22). El RMSTo varía de 42.6 a 57.5 $t\ ha^{-1}$ para las distintas variedades. Algunos valores son superiores a los reportados por Palma-López *et al.* (2002) para la misma área de estudio, cuyos valores fueron de 36.9 a 47.9 $t\ ha^{-1}$ para distintas unidades de suelo.

La interacción NxV indica que en las variedades COLPOSCTMEX 06-271, COLPOSCTMEX 06-2362 y MEX 68-P23 el RMSTo se incrementó conforme aumentó la dosis

de nitrógeno aplicada; sin embargo, en las variedades ATEMEX 96-40, MEX 69-290 y CP 72-1210 el RMSTo solo se incrementó con la dosis 120 kg ha⁻¹ de N y descendió con 180 kg ha⁻¹ de N; mientras que con 120 y 180 kg N ha⁻¹ se obtuvo el menor y mayor RMSTo en las variedades COLPOSCTMEX 06-039, COLPOSCTMEX 05-223 y RD 75-11. La COLPOSCTMEX 06-474 fue la única variedad que presentó el rendimiento más alto de materia seca con el tratamiento sin aplicación de N; lo cual indica que esta variedad requiere poco N o es muy eficiente para tomar el N del suelo.

Cuadro 22. Rendimiento de materia seca total (t ha⁻¹) de 10 variedades de caña de azúcar con diferentes dosis de nitrógeno en el Ingenio Azsuremex.

Variedades	Dosis N (kg ha ⁻¹)			Media variedad†
	0	120	180	
COLPOSCTMEX 06-039	45.0	37.6	45.3	42.6c
COLPOSCTMEX 06-271	40.0	43.6	54.8	46.1bc
COLPOSCTMEX 06-474	51.3	37.7	47.5	45.5bc
COLPOSCTMEX 06-2362	40.1	49	63.7	50.9abc
COLPOSCTMEX 05-223	55.0	43.2	63.7	54.0ab
ATEMEX 96-40	51.3	64.2	57.1	57.5a
RD 75-11	49.0	47.9	61.6	53.3ab
MEX 69-290	48.7	56.6	41.3	48.9abc
MEX 68-P23	31.9	42.7	57.6	44.0bc
CP 72-1210	45.3	51.3	48.4	48.3abc
Media dosis (N) †	45.6b	47.4b	54.1a	49.1
C.V (%)	13.2			
Prob. F:				
Dosis N (N)	0.001**			
Variedades (V)	0.001**			
Interacción (NxV)	0.001**			

†Medias con la misma literal dentro de la hilera o columna son iguales estadísticamente Tukey (P ≤ 0.05). ** Altamente significativo.

5.10. Consumo de nitrógeno

5.10.1. Consumo de nitrógeno por la paja (CNP)

Para el consumo de nitrógeno de la paja (CNP) se observa diferencia altamente significativa para el efecto de dosis de nitrógeno (N) y variedad (V) y no significativa para la interacción NxV. Se observó una respuesta lineal en el CNP con respecto a las dosis de N aplicadas, debido a una mayor producción de materia seca de paja (Cuadro 20). El coeficiente de variación fue de 17.8% el cual, considerando que se trata de un experimento bajo condiciones de campo, se considera aceptable (Cuadro 23).

La prueba de Tukey indica que el CNP más alto lo obtuvo la variedad RD 75-11, seguida de la MEX 68-P23; mientras que la MEX 69-290 y CP 72-1210 presentaron el CNP más bajo y el resto de las variedades formó un grupo con valores intermedios para esta variable. El promedio del CNP en las 10 variedades de caña de azúcar fue 103.4 kg ha^{-1} , lo cual hace evidente la importancia de incorporar al suelo los residuos de cosecha de este cultivo para aumentar el contenido de materia orgánica del mismo y con la idea de aportar al sistema cantidades importantes de N que pueda estar disponible para las plantas, lo cual puede contribuir a la disminución de las dosis de N recomendadas para el área de estudio (Salgado *et al.*, 2008).

Los valores promedio para el CNP en las 10 variedades de caña de azúcar evaluadas en este estudio variaron de 82.4 a 124.5 kg ha^{-1} de N y se consideran altos en comparación con 49.7 a 66.3 kg ha^{-1} de N reportados para la paja de caña de azúcar en diferentes subunidades de suelo en el área de estudio por Salgado *et al.* (2008).

Cuadro 23. Consumo de nitrógeno (kg ha⁻¹) de la paja de 10 variedades de caña de azúcar con diferentes dosis de nitrógeno en el ingenio Azsuremex.

Variedades	Dosis N (kg ha ⁻¹)			Media variedad†
	0	120	180	
COLPOSCTMEX 06-039	91.6	109.5	119.4	106.8abc
COLPOSCTMEX 06-271	71.5	95.7	120.5	92.8abc
COLPOSCTMEX 06-474	92.5	102.4	126.5	106.5abc
COLPOSCTMEX 06-2362	76.7	105.0	145.5	109.0abc
COLPOSCTMEX 05-223	100.2	115.0	113.4	108.8abc
ATEMEX 96-40	97.7	99.1	109.9	102.8abc
RD 75-11	105.6	131.3	136.5	124.5a
MEX 69-290	72.4	97.0	82.5	84.0c
MEX 68-P23	104.7	113.4	130.1	116.1ab
CP 72-1210	54.4	91.8	101.1	82.4c
Media dosis (N) †	86.1c	105.7b	118.2a	103.4
C.V (%)	17.8			
Prob. F:				
Dosis N (N)	0.001**			
Variedades (V)	0.002**			
Interacción (NxV)	0.500NS			

†Medias con la misma literal dentro de la hilera o columna son iguales estadísticamente Tukey ($P \leq 0.05$). NS: no significativo, ** Altamente significativo.

5.10.2. Consumo de nitrógeno por los tallos (CNT)

De acuerdo con el ANOVA se encontró diferencia significativa para el consumo de nitrógeno por los tallos (CNT) con respecto a la dosis de N (N) y no significativa para el efecto de la variedad (V) y la interacción NxV. El coeficiente de variación de 35.2 % indica la alta variabilidad de este parámetro lo cual seguramente condicionó la falta de significancia estadística (Cuadro 24).

La prueba de Tukey muestra que el mayor CNT fue con la dosis de 180 kg N ha⁻¹ y el más bajo con la dosis testigo, lo cual indicaría que el CNT depende de la dosis de N aplicada independientemente de la variedad utilizada. El valor promedio del CNT de las 10 variedades

varió de 67.4 a 116.5 kg ha⁻¹, lo cual indicaría la cantidad de este nutrimento que el cultivo de caña de azúcar extrae y que no se reintegra al ciclo del nitrógeno en el suelo debido a la cosecha de los tallos y su posterior traslado al molino. También es la cantidad que debe asegurarse con las dosis de fertilizantes, lógicamente afectándola con la eficiencia de utilización del fertilizante, para evitar el empobrecimiento del N del suelo (Salgado *et al.*, 2008).

Cuadro 24. Consumo de nitrógeno (kg ha⁻¹) de tallos de 10 variedades de caña de azúcar con diferentes dosis de nitrógeno en el Ingenio Azsuremex.

Variedades	Dosis N (kg ha ⁻¹)			Media variedad†
	0	120	180	
COLPOSCTMEX 06-039	61.5	104.5	119.3	95.1a
COLPOSCTMEX 06-271	68.8	53.8	85.6	67.4a
COLPOSCTMEX 06-474	97.0	82.9	163.2	109.9a
COLPOSCTMEX 06-2362	68.4	62.3	99.1	76.6a
COLPOSCTMEX 05-223	88.3	88.4	121.5	100.8a
ATEMEX 96-40	71.5	68.6	119.0	88.3a
RD 75-11	46.8	107.7	114.5	89.6a
MEX 69-290	60.7	72.4	97.7	76.9a
MEX 68-P23	91.3	128.6	128.9	116.5a
CP 72-1210	92.9	126.2	55.6	91.6a
Media dosis (N) †	74.1b	89.6ab	109.4a	91.0
C.V (%)	35.2			
Prob. F:				
Dosis N (N)	0.009**			
Variedades (V)	0.07NS			
Interacción (NxV)	0.10NS			

†Medias con la misma literal dentro de la hilera o columna son iguales estadísticamente Tukey (P ≤ 0.05). NS: no significativo, ** Altamente significativo.

5.10.3. Consumo de nitrógeno total (CNTo)

De acuerdo con los resultados del ANOVA, se encontró diferencia significativa para el consumo de nitrógeno de las variedades de caña de azúcar (CNTo) con respecto a las dosis de nitrógeno (N) y las variedades (V) y no significativa con respecto a la interacción NxV (Cuadro 25). El coeficiente de variación fue de 18.1 %, considerado adecuado por tratarse de condiciones de campo.

El CNTo presentó una respuesta lineal con respecto al incremento de la dosis de N aplicado, siendo mayor en la dosis de kg ha^{-1} de N; las variedades tienden a consumir más nitrógeno por la mayor producción de materia seca total.

Con respecto a las variedades la MEX 68-P23 presentó el más alto CNV (232.5 kg ha^{-1} de N), mientras que las variedades COLPOSCTMEX 06-271 y MEX 69-290 obtuvieron el CNTo más bajo (160.3 y 160.9 kg ha^{-1} de N respectivamente). El resto de las variedades formaron un grupo con valores intermedios para esta variable (Cuadro 25). El valor promedio de consumo de nitrógeno de las variedades fue 194.4 kg ha^{-1} , similar a 190 kg ha^{-1} de N reportado por Franco *et al.* (2011) en Brasil.

El consumo de nitrógeno total de las 10 variedades varió de 160.3 a 232.5 kg ha^{-1} , y en todos los casos fue mayor que la dosis de N aplicado, esto indicaría que cantidades importantes de N consumido por el cultivo se derivan de otras fuentes como la mineralización de la materia orgánica del suelo (Dourado-Neto *et al.*, 2010), la incorporación y posterior mineralización de los residuos de cosecha incorporados al suelo durante la preparación del terreno (Fortes *et al.*, 2013), la fijación biológica de N por microorganismos presentes en el suelo (Urquiaga *et al.*,

1992) y las precipitaciones de tipo tormentas eléctricas presentadas el área de estudio durante el experimento.

Cuadro 25. Consumo de nitrógeno total (kg ha⁻¹) de 10 variedades de caña de azúcar con diferentes dosis de nitrógeno en el Ingenio Azsuremex.

Variedades	Dosis N (kg ha ⁻¹)			Media variedad†
	0	120	180	
COLPOSCTMEX 06-039	153.1	214.1	238.8	202.0ab
COLPOSCTMEX 06-271	140.4	149.5	206.1	160.3b
COLPOSCTMEX 06-474	189.6	185.3	289.5	216.4ab
COLPOSCTMEX 06-2362	145.1	167.3	244.6	185.7ab
COLPOSCTMEX 05-223	188.5	203.4	234.9	209.6ab
ATEMEX 96-40	169.4	167.9	228.9	191.1ab
RD 75-11	152.5	239.0	251.0	214.1ab
MEX 69-290	133.2	169.2	180.2	160.9b
MEX 68-P23	196.6	242.0	259.1	232.5a
CP 72-1210	147.4	218.1	156.7	174ab
Media dosis (N)†	160.3c	195.3b	227.6a	194.4
C.V (%)	18.1			
Prob. F:				
Dosis N (N)	0.001**			
Variedades (V)	0.005**			
Interacción (N*V)	0.10NS			

†Medias con la misma literal dentro de la hilera o columna son iguales estadísticamente Tukey (P ≤ 0.05). NS: no significativo, ** Altamente significativo.

5.11. Índice de eficiencia interna de utilización de nitrógeno (kg N t caña producida⁻¹)

El índice de eficiencia interna de utilización de nitrógeno (EI) fue diferente entre variedades y dosis de N. El EI podemos clasificarlo en bajo < 1.7, medio 1.7-1.9, y alto >1.9 kg N t caña producida⁻¹; mientras que el rendimiento de caña de las variedades se clasificó en bajo <90.0 t ha⁻¹ y alto > 90.0 t ha⁻¹. Al combinar estos dos parámetros, las variedades de caña forman cuatro grupos los cuales también son diferentes entre dosis de N (Figura 3). Con la dosis de 0 kg ha⁻¹ de N las variedades se clasificaron de la siguiente manera: variedades con bajo rendimiento y bajo

EI (COLPOSCTMEX 06-271), variedades con bajo rendimiento y medio EI (MEX 69-290 y CP 72-1210), variedades con alto rendimiento y bajo EI (RD 75-11, ATEMEX 96-40, COLPOSCTMEX 06-2362 y COLPOSCTMEX 06-039) y variedades con alto rendimiento y medio EI (COLPOSCTMEX 05-223, COLPOSCTMEX 06-474 y MEX 68-P23). Con la dosis de 120 kg ha⁻¹ de N se clasificaron como: variedades con bajo rendimiento y medio EI (COLPOSCTMEX 06-271), variedades con alto rendimiento y bajo EI (COLPOSCTMEX 05-223, ATEMEX 96-40, COLPOSCTMEX 06-2362 y COLPOSCTMEX 06-474), variedades con alto rendimiento y medio EI (MEX 69-290) y variedades con alto rendimiento y alto EI (RD 75-11, CP 72-1210, COLPOSCTMEX 06-039 y MEX 68-P23). Con la dosis de 180 kg ha⁻¹ de N las variedades se clasificaron como sigue: variedades con bajo rendimiento y alto EI (MEX 69-290 y COLPOSCTMEX 06-271), variedades con alto rendimiento y bajo EI (COLPOSCTMEX 05-223 y CP 72-1210), variedades con alto rendimiento y medio EI (ATEMEX 96-40 y RD 75-11) y variedades con alto rendimiento y alto EI (COLPOSCTMEX 06-039, COLPOSCTMEX 06-039, COLPOSCTMEX 06-474 y MEX 68-P23).

Se puede observar que para las variedades COLPOSCTMEX 06-271 y MEX 69-290, un aumento en el EI no condujo a un incremento en el rendimiento. La variedad COLPOSCTMEX 06 271, se comportó siempre como una variedad de bajo rendimiento, aunque el EI aumentó conforme se incrementó la dosis de N. El EI varió de 1.5-2.4 en las 10 variedades y se considera alto en comparación con el índice de utilización de N de 1.0-1.5 que reporta Pineda *et al.* (2014). Se sugiere utilizar esta información para ajustar la dosis de N según el EI de cada variedad de caña de azúcar.

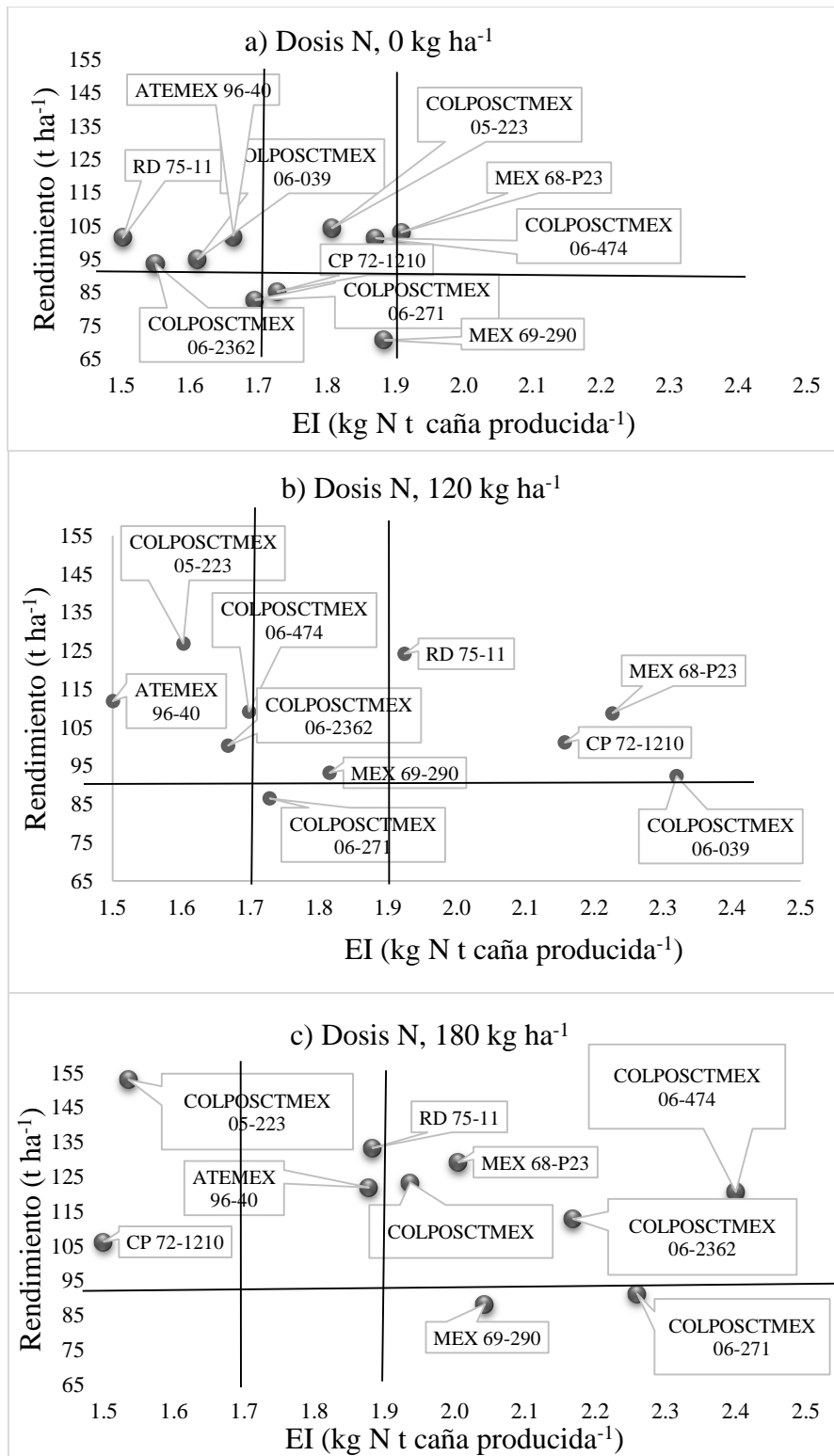


Figura 3. Relación entre el rendimiento (t ha⁻¹) y el índice de eficiencia interna de utilización de nitrógeno (EI) de diez variedades de caña de azúcar, con tres dosis de fertilización.

5.12. Análisis económico de la fertilización nitrogenada

Las variedades COLPOS CTMEX 05-0223, RD 75-11 y MEX 69-290, con la dosis de 120 kg ha⁻¹ de N, generan una tasa de retorno al capital variable (TRCV) de \$1.8 respectivamente, por cada \$1.00 invertido en fertilizante nitrogenado; lo cual corrobora que la dosis recomendada por Salgado *et al.* (2008) para este suelo es adecuada al producir los mayores incrementos en el rendimiento de caña de azúcar (Cuadro 26).

Las variedades COLPOSCTMEX 06-039, COLPOS CTMEX 05-223, RD 75-11 y MEX 68-P23, con la dosis de 180 kg ha⁻¹ de N, generan una tasa de retorno al capital variable (TRCV) > \$1.7, por cada \$1.00 invertido ha⁻¹ en fertilizante nitrogenado. Corroborando la alta rentabilidad de la fertilización nitrogenada en el cultivo de caña de azúcar. Los valores de la TRCV son bajos por el bajo precio de la caña, ya que incrementos de rendimiento de caña > 10 t ha⁻¹ se consideran alentadores en muchas regiones cañeras del mundo, pero no en este caso. El resto de las variedades, no superó la tasa de retorno mínima del 50 %, lo cual indicaría que en el ciclo de plantilla no deben fertilizarse ya que económicamente no es rentable (CIMMYT, 1988).

Cuadro 26. Análisis económico de la fertilización nitrogenada para 10 variedades de caña de azúcar y tres dosis NPK (00-60-100, 120-60-100 y 180-60-100), en el Ingenio Azsuremex.

Variedades	Dosis N (kg ha ⁻¹)	Rto (kg ha ⁻¹)	Costos		Incremento		TRCV (\$ ha ⁻¹)
			variables (\$ ha ⁻¹)	IN+CF (\$ ha ⁻¹)	Rto (kg ha ⁻¹)	IN+CF (\$ ha ⁻¹)	
COLPOSCTMEX							
06-039	0	95	2,812	36,461.0	-	-	-
	120	92.3	4,928	35,424.7	-	-	-
	180	123.3	5,986	47,322.5	28.3	10,861.5	1.8*
COLPOSCTMEX							
06-271	0	82.8	2,812	31,778.6	-	-	-
	120	86.5	4,928	33,198.7	3.7	1,420.1	0.3
	180	91.2	5,986	35,002.6	8.4	3,223.9	0.5
COLPOSCTMEX							
06-474	0	101.3	2,812	38,878.9	-	-	-
	120	109.1	4,928	41,872.6	7.8	2,993.6	0.6
	180	120.6	5,986	46,286.3	19.3	7,407.3	1.2
COLPOSCTMEX							
06-2362	0	93.6	2,812	35,923.7	-	-	-
	120	100.3	4,928	38,495.1	6.7	2,571.5	0.5
	180	112.8	5,986	43,292.6	19.2	7,369.0	1.2
COLPOSCTMEX							
05-223	0	104.3	2,812	40,030.3	-	-	-
	120	126.9	4,928	48,704.2	22.6	8,673.9	1.8*
	180	153	5,986	58,721.4	48.7	18,691.1	3.1*
ATEMEX 96-40							
	0	101.8	2,812	39,070.8	-	-	-
	120	111.9	4,928	42,947.2	10.1	3,876.4	0.8
	180	121.9	5,986	46,785.2	20.1	7,714.4	1.3
RD 75-11							
	0	101.5	2,812	38,955.7	-	-	-
	120	124.2	4,928	47,668.0	22.7	8,712.3	1.8*
	180	133.3	5,986	51,160.5	31.8	12,204.8	2.0
MEX 69-290							
	0	70.7	2,812	27,134.7	-	-	-
	120	93.2	4,928	35,770.2	22.5	8,635.5	1.8*
	180	88.2	5,986	33,851.2	17.5	6,716.5	1.1
MEX 68-P23							
	0	103	2,812	39,531.4	-	-	-
	120	108.7	4,928	41,719.1	5.7	2,187.7	0.4
	180	129.2	5,986	49,587.0	26.2	10,055.6	1.7*
CP 72-1210							
	0	85.3	2,812	32,738.1	-	-	-
	120	101.1	4,928	38,802.2	15.8	6,064.0	1.2
	180	106.2	5,986	40,759.6	20.9	8,021.4	1.3

† IN+CF= Ingreso neto + Costos fijos, TRCV= Tasa de retorno al capital variable, *tasa de retorno >50 %.

VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las variedades evaluadas en el estudio presentaron diferencia significativa en la concentración foliar de N, y no significativa con respecto a la dosis de N aplicadas y su interacción NxV. No se encontró respuesta significativa en la concentración foliar de P y K y contenido de clorofila. Por lo tanto se rechaza la primera hipótesis.

La concentración foliar de N y P fue adecuada no así K que fue deficiente. Lo que sugiere revisar la dosis de K recomendada para el suelo Cambisol Háplico (Límico-Éutrico-Calcárico) del Ingenio Azsuremex.

La variedad ATEMEX 96-40 presentó la tasa fotosintética, conductancia estomática y tasa de transpiración más altas, seguida de la COLPOSCTMEX 05-223 y RD 75-11, lo cual explicaría el alto rendimiento de caña obtenido por estas variedades; mientras que la MEX 69-290 y MEX 68-P23 fueron las que obtuvieron el valor más bajo para dichas variables. Para la Ci en este estudio, ésta fue mayor en la MEX 69-290 y menor para la ATEMEX 96-40. Estos resultados demuestran las diferencias varietales en cuanto a parámetros fisiológicos de la caña de azúcar se refiere, por ello se acepta la segunda hipótesis planteada.

La conductancia estomática y tasa de transpiración mostraron variación entre variedades y dosis de N aplicadas. A los 150 días después de la siembra, la variedad ATEMEX 96-40 presentó alta A en respuesta al incremento en la radiación fotosintéticamente activa (PAR), pero también mayor contenido de clorofila total, tasa fotosintética, conductancia estomática y tasa de transpiración en respuesta a la fertilización nitrogenada.

De acuerdo a los resultados obtenidos en este experimento con respecto a los parámetros de calidad de jugo, se puede concluir que dosis altas de nitrógeno pueden afectar negativamente la calidad de jugo de la caña de azúcar, aunque el grado de afectación dependerá de la variedad utilizada.

Se observó una respuesta lineal positiva del rendimiento con respecto al incremento en la aplicación de N, a excepción de la MEX 69-290 que presentó el rendimiento más alto con la dosis 120 kg ha⁻¹ de N, que indica que en el suelo Cambisol Háptico (Límico-Éutrico-Calcárico), el rendimiento de caña depende de la variedad utilizada y la dosis de N aplicada. Por lo tanto, se rechaza la hipótesis número tres.

El consumo de nitrógeno de las variedades aumentó conforme se incrementó la dosis de N aplicada. La MEX 68-P23 fue la variedad con el mayor consumo de N (232.5 kg ha⁻¹); mientras que la MEX 69-290 y COLPOSCTMEX 06-271 fueron las variedades con el menor consumo de N (160.9 y 160.3 kg ha⁻¹ respectivamente). Por ello se acepta la hipótesis número cuatro.

El índice de consumo interno de nitrógeno varió de 1.5-2.4 kg de N t de tallo⁻¹ en las 10 variedades. Por ello, se recomienda utilizar esta información para ajustar la dosis de N según el EI de cada variedad de caña de azúcar.

Las variedades COLPOSCTMEX 05-223, RD 75-11 y MEX 69-290, con la dosis de 120 kg ha⁻¹ de N, generan una tasa de retorno al capital variable (TRCV) de \$1.8; mientras que las variedades COLPOSCTMEX 06-039, COLPOS CTMEX 05-223, RD 75-11 y MEX 68-P23, con la dosis de 180 kg ha⁻¹ de N, generan una TRCV > \$1.7, respectivamente, corroborando la rentabilidad de la fertilización nitrogenada. Se acepta la hipótesis número cinco.

VIII. LITERATURA CITADA

Achieng O., G., S. O. Nyandere, P. O. Owuor, G. O. Abayoand and C.O. Omondi. 2013. Effects of rate and split application of nitrogen fertilizer on yield of two sugarcane varieties from ratoon crop. *Greener Journal of Agricultural Sciences*. 3: 235-239.

Amaya E., A., J. H. Cock, A. P. Hernández y J. E. Irvine. 1995. Biología. In: El cultivo de la caña en la zona azucarera de Colombia. Centro de Investigaciones de la Caña de Azúcar de Colombia (CENICAÑA). Cali, Colombia. pp 31-62.

Ambachew D. and A. Fantaye. 2009. Determination of optimum nitrogen rate for sugarcane at Wonji-Shoa sugarcane plantation. *Proc. Ethiop. Sugar. Ind. Bienn. Conf.* 1:105-115.

Arenas J., G. Cayón y O. Agudelo. 2004. Respuestas fisiológicas y acumulación de materia seca de genotipos de soya en el Valle del Cauca. *Fitotecnia Colombiana* 4:20-26.

Arzola N. 2010. Diagnóstico de la necesidad de fertilizantes nitrogenados en caña de azúcar. Parte I: Enfoque tradicional. *Revista Cuba y Caña*, 9 p.

Arzola P., N. y P. Pablos R. 2012. Diagnóstico de la necesidad de fertilizantes nitrogenados en la caña de azúcar. Enfoque tradicional. *Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal Sistema de Información Científica. Ciencia en su PC número 1.* p 13-23.

Batta S., K., S. Kaur and A. P. S. Mann. 2002. Sucrose accumulation and maturity behaviour in sugarcane is related to invertase activities under subtropical conditions. *International Sugarcane Journal*. 104:10-13.

Boaretto A., T. Muraoka e P. Trevelin. 2007. Uso eficiente de nitrogenio nos fertilizantes convencionais. *Informacoes agronómicas*. 120:13-14.

Brito E., E.R Romero, S. D. Casen, L.G. Alonso y P. A. Digonzelli. 2007. Métodos no destructivos de estimación del área foliar por tallo en la variedad LCP 85-384 de caña de azúcar. Rev. Industrial y Agrícola de Tucumán. 84: 29- 32.

Bunce J., A. 2005. What is the usual internal carbon dioxide concentration in C4 species under midday field conditions?. Photosynthetica, 43:603-608.

Cabrera J., A., y R. Zuaznábar. 2010. Respuesta de la caña de azúcar a la fertilización nitrogenada en un experimento de larga duración con 24 cosechas acumuladas. Cultivos Tropicales, 31:93-100.

Cañeros, (Unión Nacional de Cañeros A.C.). 2015. Estadísticas de la agroindustria. www.caneros.org.mx. Consultado el 18 de junio de 2015.

Chaimsohn F., M. Montiel, E. Villalobos y J. Mora. 2008. Anatomía micrográfica del folíolo de la palma neotropical *Bactris gasipaes* (Arecaceae). Biol. Trop. 56:952-959.

Córdova G., G., S. Salgado G., M. Castelán E., D.J. Palma L., E. García M., y S. Córdova S. 2010. Fertilización alternativa para el cultivo de caña de azúcar en el Ingenio Presidente Benito Juárez. In: Memorias del Simposio: Aportes del Colegio de Postgraduados a la Investigación en Caña de Azúcar. Sergio Salgado García, Mepivoseh Castelán Estrada, Cesáreo Landeros Sánchez y Emilio Manuel Aranda Ibáñez (eds). Córdoba Veracruz. pp 65-73.

CIMMYT. (Centro Internacional de Mejoramiento de maíz y Trigo). 1988. La Formulación de Recomendaciones a Partir de Datos Agronómicos: Un Manual Metodológico de Evaluación Económica. Ed. Revisada. CIMMYT. México. 79 p.

Cha-Um S., and C. Kirdmanee. 2008. Effect of osmotic stress on proline accumulation, photosynthetic abilities and growth of sugarcane plantlets (*Saccharum officinarum* L.). Park. J. Bot. 40: 2541-2552.

Corniani N., T. F. Fumis, L.M.R. Remaeh, A.C. Cataneo. 2006. Determinação das trocas gasosas e de potencial hídrico através do uso de sistemas portáteis na avaliação do estresse. In: Simpósio internacional de iniciação científica da Universidade de São Paulo, 2006, Piracicaba Brasil. pp 1-14.

De Oliveira R., A., E. Daros, J. L. Camargo Z., H. Weber, O. Teruyo I., J. C. Bernaldo-Filho, K. C. Zuffellato-Ribas & D. K. Tramuja Da S. 2007. Área foliar em três cultivares de cana-de-açúcar e sua correlação com a produção de biomassa. *Pesq. Agropec. Trop.* 37: 71-76.

De Silva A., L.C., and W.A.J.M. De Costa. 2009. Varietal variation in stomatal conductance, transpiration and photosynthesis of commercial sugarcane varieties under two contrasting water regimes. *Tropical Agricultural Research & Extension* 12:97-102.

Dourado-Neto, D., D. Powlson, A. Bakar R., O. O. S. Bacchi, M. V. Basanta, P. T. Cong, G. Keerthisinghe, M. Ismaili, S. M. Rahman, K. Reichardt, M.S.A. Safwat, R. Sangakkara, L. C. Timm, J.Y. Wang, E. Zagal and C. Van Kessel. 2010. Multiseason recoveries of organic and inorganic nitrogen-15 in tropical cropping systems. *Soil Science Society of America Journal* 74: 139-152.

Endres L., J. Vieira S., V. Marques F., and G.V. De Souza B. 2010. Photosynthesis and water relations in Brazilian sugarcane. *The Open Agriculture Journal* 4:31-37.

Farrukh S., M., A. Ghaffar, S. Ahmad A., M. Akhtar C. and M. Faisal B. 2012. Effect of Nitrogen on Growth and Yield of Sugarcane. *Journal American Society of Sugar Cane Technologists.* 32:75-93.

Ferreira E., A. 2005. Anatomía cuantitativa, micromorfología y sensibilidad a los herbicidas en genotipos de caña de azúcar. Tesis de Maestría en Botánica. Universidad Federal de Vicosa, Brasil. 83 p.

Ferreira E., A., I. Aspiazú, G. Concenço, A. Ferreira S., A. A. Silva, L. L. Galon and D. Valadão S. 2011. Evaluation and grouping of sugarcane genotypes in agreement with their physiologic characteristics types. *Revista Tropica – Ciências Agrarias e Biologicas*, 5:30-38.

Fortes C., P.C.O. Trivelin, A.C. Vitti, D. A. Ferreira, H.C.J. Franco and R. Otto. 2011. Recovery of nitrogen (^{15}N) by sugarcane from previous crop residues and urea fertilisation under a minimum tillage system. *Sugar Technol* 13:42–46.

Fortes C., A. C. Vitti, R. Otto, D. Alves F., H. C. Junqueira F. and P. C. Ocheuze T. 2013. Contribution of nitrogen from sugarcane harvest residues and urea for crop nutrition. *Scientia Agrícola*. 70:313-320.

Franco J., E.C., P.C. Trivelin O., A.C. Vitti., R Otto., C.E. Faroni y S. Salgado G. 2008a. Aprovechamiento del ^{10}B -fertilizante por la caña de azúcar. In: *Memorias del VII Congreso de Técnicos Azucareros de Latinoamérica y el Caribe, caña de azúcar: oportunidades y desafíos para Latinoamérica*. Asociación de Técnicos Azucareros de Guatemala, ATALAC (comps). Guatemala. 6 p.

Franco J., E.C., P.C.O. Trivelin, C.E.F. Faroni, A.C. Vitti and R. Otto. 2008b. Aproveitamento pela cana-de-ac,úcar da adubac,ãõ nitrogenada de plantio. *Rev Bras Cienc Solo*. 32:2763–2770.

Franco J., E.C., R. Otto, C. E. Faroni, A. C. Vitti, E. C. Almeida de O. and P. C. Ocheuze T. 2011. Nitrogen in sugarcane derived from fertilizer under Brazilian field conditions. *Field Crops Research* 121:29–41.

Galon L., G. Concenço, E. A. Ferreira, I. Aspiazu, A. F. da Silva, C. L. Giacobbo and A. Andres. 2009. Influence of biotic and abiotic stress factors on physiological traits of sugarcane varieties. 185-208. <http://dx.doi.org/10.5772/55255>.

Gava J., C. G., A. Silva P., C. Ocheuze T., A. C. Vitti C., P. Penati y M. M. Caputo. 2006. Acumulación de fitomasa y macro nutrientes en rebrotes de caña de azúcar cultivados en suelos cubiertos por paja. In: Memorias del VI Congreso de la Asociación de Técnicos Azucareros de Latino América y el Caribe. ATALAC (comps). Guayaquil, Ecuador. pp 1-9.

Goncalves E., R., V.M. Ferreira, J.V. Silva, L. Endres, T.P. Barbosa and W. De G. Duarte. 2010. Trocas gasosas e fluorescência da clorofila a em variedades de cana-de-açúcar submetidas à deficiência hídrica. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. 14: 378-386.

Gutiérrez M., F.A., C. Arias C., L. Dendooven, R. Méndez S., M. A. Rodríguez M., N. Ochoa A. y L.A Bello P. 2002. Regulación enzimática de la acumulación de sacarosa en plantas de caña de azúcar (*Saccharum spp*). Agrociencia. 36:411-419.

Halliday D., H. and M. E. Trenkell. 1992. World Fertilizer Use Manual. International Fertilizer Industry Association. Germany. 632 p.

Hopkins W., G. and N. P. A. Hüne. 2004. Introduction to Plant Physiology. Third Edition. John Wiley & Sons, Inc. USA. pp. 45-61.

Inman-Bamber, N.G., G. D. Bonnett, M. F. Spillman, M. L. Hewitt and J. Jackson. 2008. Increasing sucrose accumulation in sugarcane by manipulating leaf extension and photosynthesis with irrigation. Australian Journal of Agricultural Research 59:13–26.

Irvine J., E. 1975. Relations of photosynthetic rates and leaf and canopy characters to sugarcane yield. Crop Science. 15:671–676.

Jangpromma, N., P. Songsri, S. Thammasirirak and P. Jaisil. 2010. Rapid assessment of chlorophyll content in sugarcane using a SPAD chlorophyll meter across different water stress conditions. Asian Journal of Plant Sciences, 9:368-374.

Jaroenseng, S., A. Wongmaneroj and S. Amkhab. 2010. Results of studies the possible correlations between SPAD value and total nitrogen contents in the leaves of sugarcane (*Saccharum officinarum* L.). International Society for Southeast Asian Agricultural Sciences (ISSAAS) Journal. 16:123-161.

Jones B., J., B. Wolf and H. A. Mills. 1991. Plant Analysis Handbook: A Practical Sampling, Preparation, Analysis and Interpretation Guide. Micro-Macro publishing Inc. Athens, Georgia, USA. 213 p.

Junguo L., Y. Liangzhi, A. Manouchehr, M. Obersteiner, M. Herrero, J. Alexander. B. Zehnder and H. Yang. 2010. A high-resolution assessment on global nitrogen flows in cropland. PNAS Direct Submission. 107:8035–8040.

Kumara A., D.S. and D. C. Bandara. 2001. Influence of nitrogen application and varietal differences on selected physiological parameters of sugarcane. Tropical Agricultural Research. 13: 220-230.

Krugh B., L. Bichham and D. Miles. 1994. The solid-state chlorophyll meter, a novel instrument for rapidly and accurately determining the chlorophyll concentrations in seedling leaves. Maize genetics cooperation. News Letter 68: 25-27.

Larcher, W. 2000. Ecofisiología Vegetal. Rima, Sao Carlos, Sao Paulo, Brasil. 531 p.

Marchiori P., E.R., R.V. Ribeiro, L. Da Silva, R.S. Machado, E.C. Machado, and M.S. Scarpari. 2010. Plant growth, canopy photosynthesis and light availability in three sugarcane varieties. Sugar Tech 12: 160-166.

Melgar M., A. Meneses, H. Orozco, O. Pérez y R. Espinosa. 2102. El Cultivo de la Caña de Azúcar en Guatemala. Centro Guatemalteco de Investigación y Capacitación de la Caña de Azúcar (CENGICAÑA). Guatemala. 512 p.

Mengel H., and E. A. Kirkby. 2000. Principles of Plant Nutrition. International Potash Institute. Worblaufen –BERN, Switzerland. 665 p.

Meyer J., H., A. W. Schumann., R. A. Wood., D. J. Nixon and M. Van Den Berg. 2007. Recent advances to improve nitrogen use efficiency of sugarcane in the South African Sugar Industry. *Proc. Int. Soc. Sugar Cane Technol.* 26:238-245.

Minic, Z. 2008. Physiological roles of plant glycoside hydrolases. *Planta.* 227:723–740.

Moguel O., E.J. y J.F. Molina-Enriquez M. 2000. La precipitación pluvial en Tabasco y Chiapas. *Revista de divulgación, División Académica de Ciencias Biológicas –UJAT.* Volumen 5:1-8.

Moran, R. 1982. Formulae for determination of chlorophyll pigments extracted with N,N-dimethylformamide. *Plant Physiol.* 69: 1376-1381.

NOM-021-RECNAT. 2001. Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis. SEMARNAT. MEXICO. 88 p.

Núñez E., R. 2009. El Suelo Como Medio Natural en la Nutrición de Cultivos. In: *Nutrición de cultivos.* Alcántar G., G. y L. I. Trejo-Téllez (comps). Colegio de Postgraduados, Mundi-Prensa México, S.A de C.V. Rio Pánuco 141, col. Cuauhtémoc México, D.F. 454 p.

Paiva, R. y L. M. Oliveira. 2006. *Fisiología y Producción Vegetal.* Lavras: Editora UFLA. Brasil. 104 p.

Palma-López, D. J., S. Salgado G., A. Trujillo N., J.J. Obrador O., L. C. Lagunes E., J. Zavala C., A. Ruiz B. y M.A. Carrera M. 1995. Diagnóstico de la fertilidad de los suelos cañeros del área de abastecimiento del Ingenio Tenosique. Campus Tabasco, CP-Servicios Agroquímicos PYC S.A de C.V. H. Cárdenas, Tabasco. 50 p.

Palma-López, D. J., S. Salgado G., J.J. Obrador O., A. Trujillo N., L.C. Lagunes E., J. Zavala C., A. Ruiz B. y M.A. Carrera M. 2002. Sistema integrado para recomendar dosis de fertilización en caña de azúcar (SIRDF). *Terra Latinoamericana* 20: 347-358.

Paneque V., M., J. M. Calaña, L. Rodríguez y E. R. Castellanos. 2005. Estudio de la fertilización nitrogenada en variedades de la caña de azúcar cultivadas en diferentes tipos de suelos (caña planta). *Cultivos Tropicales*. 26: 95-100.

Patane, P. and A. Vibhute. 2014. Chlorophyll and Nitrogen estimation techniques: a review. *International Journal of Engineering Research and Reviews*, 2:33-41.

Pérez, O. 2012. Nutrición y Fertilización. In: *El Cultivo de la Caña de Azúcar en Guatemala*. Melgar, M., A. Meneses, H. Orozco, O. Pérez y R. Espinosa. (Eds). Centro Guatemalteco de Investigación y Capacitación de la Caña de Azúcar (CENGICANÑA). Guatemala. 512 p.

Pérez G., F. y J. B. Martínez L. 1994. *Introducción a la Fisiología Vegetal*. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid España. 218 p.

Pereira D., A., M. Gaspar, E. Alves D., E. C. Ulian, A.J Waclawovsky, M. Yutaka N., R.V Dos Santos, M. Menossi T., G. Mendes S. and M. Silveira B. 2008. Elevated CO₂ increases photosynthesis, biomass and productivity, and modifies gene expression in sugarcane. *Plant, Cell and Environment*. 31:1116–1127.

Pineda R., E., I. Rodríguez C., J. L. Burgos A., M. L. Vidal D., E. Becerra De A., F. Acosta H., y R. Más M. 2014. La fertilización nitrogenada de la caña de azúcar en un suelo con presencia de hidromorfia. *Centro Agrícola*. 41:11-15.

Radhamani R., R. Kannan and P. Rakkiyappan. 2015. Leaf chlorophyll meter readings as an indicator for sugarcane yield under iron deficient typic haplustert. *Sugar Tech*. DOI 10.1007/s12355-014-0363-9.

Rengel M., F. Gil y J. Montaña. 2011a. Crecimiento y dinámica de acumulación de nutrientes en caña de azúcar. I. Macronutrientes. *Bioagro* 21:43-50.

Rengel M., F. Gil y J. Montaña. 2011b. Crecimiento y dinámica de acumulación de nutrientes en caña de azúcar. II. Micronutrientes. *Bioagro* 23: 135-140.

Rivas, J. 2000. La luz y el aparato fotosintético. In: *Fundamentos de Fisiología Vegetal*. Azcon, J. y Talón, M. (eds.). McGraw-Hill México. Pp 131-153.

Robinson N., A. Fletcher, A. Whan, C. Critchley, N. Von Wirén, P. Lakshmanan, and S. Schmidt. 2007. Sugarcane genotypes differ in internal nitrogen use efficiency. *Functional Plant Biology* 34:1122–1129.

Robinson N., A. Fletcher, A. Whan, K. Vinall, R. Brackin, P. Lakshmanan and S. Schmidt. 2008. Sustainable sugarcane production systems: reducing plant nitrogen demand. *Proc Aust Soc Sugar Cane Technol.* 30:212-219.

Robinson N., H. Gamage, A. Whan, K. Vinall, A. Fletcher, R. Brackin, J. Holst, P. Lakshmanan and S. Schmidt. 2009. Evidence of differences in nitrogen use efficiency in sugarcane genotypes. *Proc Aust Soc Sugar Cane Technol.* 31:256-264.

Robinson N., R. Brackin, K. Vinall, F. Soper, J. Holst, H. Gamage, C. Paungfoo-Lonhienne, H. Rennenberg, P. Lakshmanan, and S. Schmidt. 2011. Nitrate paradigm does not hold up for sugarcane. *PLoS ONE.* 6:1-9.

Romero E., R., P. A. Digonzelli y J. Scandaliaris. 2009. *Manual del Cañero*. 1a ed. Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres, Tucumán Argentina. 232 p.

Sachdchina T., M. and V.V. Dimitrieva. 1995. Leaf chlorophyll content as a possible diagnostic mean for the evaluation of plant nitrogen uptake from the soil. *Plant Nutr.* 18: 1427-1437.

SAGARPA, (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación). 2015. Impactos caña de azúcar. www.sagarpa.gob.mx. Consultado el 15 de marzo de 2015.

Sage R., F., M. Melo P. and T. L Sage. 2014. Photosynthesis in Sugarcane. In: Sugarcane: Physiology, Biochemistry, and Functional Biology. Paul H. Moore, H. P. and F. C. Botha. (Eds). John Wiley & Sons, Inc. 2014. Pp. 121-152.

Salgado G., S., R. Nuñez E., y L. Bucio A. 1995. Fertilización NPK de la caña de azúcar en la Chontalpa, Tabasco. In: Memorias de la VIII Reunión Científica Forestal y Agropecuaria de Tabasco. Villahermosa, Tabasco. pp 20-26.

Salgado G., S., R. Núñez, J. J. Peña, J. D. Etchevers, J. Palma y R. M. Soto. 2003a. Manejo de la fertilización en el rendimiento, calidad del jugo y actividad de invertasas en caña de azúcar. *Interciencia* 28: 576-580.

Salgado G., S., R. Núñez E. y L. Bucio A. 2003b. Determinación de la dosis optima económica de fertilización en caña de azúcar. *Terra Latinoamericana*. 21:267-272.

Salgado G., S., D.J. Palma L., J. Zavala C., L. del C. Lagunes E., C. F. Ortiz G., M. Castelán E., A. Guerrero P., E. Moreno C., y J.A. Rincón R. 2008. Sistema Integrado para Recomendar Dosis de Fertilizantes (SIRDF) en Caña de Azúcar: Ingenio Azsuremex. Colegio de Postgraduados, Campus Tabasco. H. Cárdenas, Tabasco. México. 101 p.

Salgado-García, S., D.J. Palma-López, J. Zavala-Cruz, L.C. Lagunes-Espinoza, C.F. Ortiz-García, M. Castelán-Estrada, A. Guerrero-Peña, E.M. Aranda-Ibáñez, E. Moreno-Cáliz, y J.A. Rincón-Ramírez. 2010. Lotificación del campo cañero: una metodología para iniciar la agricultura de precisión en los ingenios de México. *Interciencia* 35:183-190.

Salgado G., S., D.J. Palma L., J. Zavala C., L. del C. Lagunes E., M. Castelán E., C. F. Ortiz G., J. F. Juárez L., O. Ruiz R., L. Armida A., J.A. Rincón R. y S. Córdova S. 2011. Un programa de fertilización sustentable para el Ingenio “Presidente Benito Juárez” en Tabasco, México. *Avances en Investigación Agropecuaria* 15:45-65.

Salgado G., S. 2011. Cambio climático global: un proceso natural o antrópico. *Revista ATAM*. 22:30-34.

Salgado G., S., E. Aranda I., M. Castelán E., H. Ortiz L., D. Palma L., A. Gómez M. y S. Córdova S. 2012. Rendimiento de paja en la cosecha mecanizada de caña de azúcar en Tabasco, México. *Tropical and subtropical agroecosystems*, 9 p (en prensa).

Salgado G., S., L. del C. Lagunes E., R. Nuñez E., C.F. Ortiz G., L. Bucio A., y E. M. Aranda I. 2013a. Caña de Azúcar Producción Sustentable. Colegio de Postgraduados. Carretera México- Texcoco, km 36.5 Montecillo, Texcoco 56230, Estado de México. 524 p.

Salgado G., S., D. J Palma L., J. Zavala C., L. del C. Lagunes E., M. Castelán E., C. F. Ortiz G., F. Juárez L., O. Ruiz R., L. Armida A. y J. A. Rincón R. 2013b. Sistema Integrado para Recomendar Dosis de Fertilizantes en Caña de Azúcar (SIRDF): Ingenio Presidente Benito Juárez (IPBJ). Grupo MASCAÑA-LPI-2: AESS. Colegio de Postgraduados, Campus Tabasco. H. Cárdenas, Tabasco. México. 84 p.

Salgado-García, S., Aranda-Ibañez E.M., Castelán-Estrada M., Ortiz-Laurel H., Palma-López D.J. y Córdova-Sánchez S. 2014. Qué hacer con la paja de la cosecha mecanizada de la caña de azúcar. *Agroproductividad* 7(2):3-7.

Silva M., A., J. A.G. Silva, J. Enciso, V. Shama and J. Jifon. 2008. Yield components as indicators of drought tolerance of sugarcane. *Sci. Agric.* 65:620-627.

Stevenson D., W.A., A. Van der Merwe, W. Benninga, and J.C.S. Allison. 1992. Response of different sugarcane varieties to greater than normal applications of nitrogen. *Proc Afr Sug Technol Ass* 66:50-53.

Subirós R., F. 1995. El Cultivo de la Caña de Azúcar. Edit. Universidad de Estatal a Distancia. San José de Costa Rica. 448 p.

Taiz, L. and E. Zeiger. 2006. *Plant Physiology*. 4th ed. Sunderland, Massachusetts: Sinauer Associates Inc. Publishers. 690 p.

Torres N., A., E. Campostrini, J. Goncalves O., and R.E. Bressan-Smith. 2005. Photosynthetic pigments, nitrogen, chlorophyll *a* fluorescence and SPAD-502 readings in coffee leaves. *Sci Hort.* 104: 199-209.

Urquiaga S., K.H.S. Cruz and R. M. Boddey. 1992. Contribution of nitrogen fixation to sugarcane: nitrogen-15 and nitrogen-balance estimates. *Soil Science Society of America* 56:105-114.

Valdez B., A., A. Guerrero P., E. García L. y J.J. Obrador O. 2008. Manual para el Cultivo y Producción de la Caña de Azúcar. Colegio de Postgraduados, Campus Tabasco. H. Cardenas, Tabasco. Mexico. 52 p.

Vieira-Megda, M.X., E. Mariano, J. M. M. Leite, H. C Junqueira F., A .C. Vitti, M. Mahmoud M., S. Ahmed K., R. Ivaney and P. C. Ocheuze T. 2015. Contribution of fertilizer nitrogen to the total nitrogen extracted by sugarcane under Brazilian field conditions. *Nutr Cycl Agroecosyst* 101:241–257.

Vitti, A.C., P.C. Ocheuze T., G.J. De Castro G., E.C. Junqueira F., I. Rodríguez B., & C.E. Faroni. 2007. Produtividade da cana-de-açúcar relacionada à localização de adubos nitrogenados aplicados sobre os resíduos culturais em canavial sem queima. *R. Bras. Ci. Solo.* 31:491-498.

Weigel, A., J.H. Meyer and S. Moodley. 2010. Nitrogen responses and nitrogen use efficiency of four sugarcane varieties in Mpumalanga. *Proc S Afr Sug Technol Ass* 83: 216 – 220.

Wellburn A., R. 1994. The spectral determination of chlorophylls a and b, as well as total carotenoids, using various solvents with spectrophotometers of different resolution. *J. of Plant Physiol.* 144: 307-313.

Wiedenfeld, B. 1997. Evaluation of new tools for determining crop nitrogen status and availability. *Subtropical Plant Science.* 49:46-49.

Wiedenfeld P., R. 2000. Water stress during different sugarcane growth periods on yield and response to N fertilization. *Agricultural Water Management* 43:173-182.

Whan A., N. Robinson, P. Lakshmanan, S. Schmidt and K. Aitken. 2010. A quantitative genetics approach to nitrogen use efficiency in sugarcane. *Functional Plant Biology* 37:448–454.

Xu, D. and Y. Shen. 2002. Photosynthetic efficiency and crop yield. In: *Handbook of Plant and Crop Physiology*. Pessarakli, M. (ed.). Marcel Dekker, New York, NY. Pp 821-834.

Yahaya M., S., A. M. Falaki, E. B. Amans and L. D. Busari. 2010. Sugarcane yield and quality as influenced by nitrogen rates and irrigation frequency. *Nigerian Journal of Research and Production*. 17:1-10.

Yang W., Z. Li, J. Wang, P. Wu, and Y. Zhang. 2013 Crop yield, nitrogen acquisition and sugarcane quality as affected by interspecific competition and nitrogen application. *Field Crops Research* 146: 44–50.

Zarco-Tejada, P.J. 2002. Leaf chlorophyll a+b and canopy LAI estimation in crops using R-T models and Hyperspectral Reflectance Imagery. In: *Congress of the European Society for Agronomy*. 7.

Zhao D., B. Glaz and J. C. Comstock. 2013. Sugarcane leaf photosynthesis and growth characters during development of water-deficit stress. *Crop science*, 53:1066-1075.