



# **COLEGIO DE POSTGRADUADOS**

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

**CAMPUS TABASCO**

**POSGRADO**

DOCTORADO EN CIENCIAS AGRÍCOLAS EN EL TRÓPICO

## **ANÁLISIS DEL CRECIMIENTO DE CULTIVARES DE CAÑA DE AZÚCAR (*Saccharum officinarum*) EN EL INGENIO SANTA ROSALÍA DE LA CHONTALPA, TABASCO**

**JOSÉ IZQUIERDO HERNÁNDEZ**

**T E S I S**

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL

PARA OBTENER EL GRADO DE

**DOCTOR EN CIENCIAS**

H. CÁRDENAS, TABASCO, MÉXICO

2021

La presente tesis, titulada: “**Análisis del crecimiento de cultivares de caña de azúcar** (*Saccharum officinarum*) en el Ingenio Santa Rosalía de la Chontalpa, 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:

DOCTOR EN CIENCIAS  
CIENCIAS AGRÍCOLAS EN EL TRÓPICO

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO



---

DR. SERGIO SALGADO GARCÍA

ASESORA



---

DRA. LUZ DEL CARMEN LAGUNES ESPINOZA

ASESOR



---

DR. DAVID JESÚS PALMA LÓPEZ

ASESOR



---

DR. SAMUEL CÓRDOVA SÁNCHEZ

H. CÁRDENAS, TABASCO, MÉXICO, 30 DE JULIO DE 2021

# Análisis del crecimiento de cultivares de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) en el Ingenio

Santa Rosalía de la Chontalpa, Tabasco

José Izquierdo Hernández, Dr.

Colegio de Postgraduados, 2021

## RESUMEN

Se estableció un experimento en condiciones de temporal, en el área de abastecimiento del Ingenio Santa Rosalía de la Chontalpa (ISRCH), Tabasco, durante los ciclos plantilla 2017/2019 y soca 2019/2020, con tres cultivares MEX 69-290, MEX 79-431 y CP 72-2086 y tres repeticiones de cada plantación y en cada ciclo, establecidas en un suelo Fluvisol eútrico. Dentro de cada parcela se establecieron cinco sitios de observación de 30 x 30 m, en los cuales se llevaron a cabo las mediciones biométricas, de biomasa, calidad de jugo e índices de vegetación. Los cultivares MEX 79-431 y MEX 69-290, presentaron respectivamente, el mayor y menor número de hijuelos durante los dos ciclos evaluados. El mayor número de hijuelos ( $15.27 \text{ m}^{-1} \text{ L}$ ) durante el ciclo plantilla se observó a los 120 días después de la siembra (DDS), mientras que en el ciclo soca se registró a los 60 días después de la cosecha (DDC) con  $24.1 \text{ hijuelos m}^{-1} \text{ L}$ . Durante el ciclo soca, se observó un incremento en el número de hijuelos con respecto al ciclo plantilla, correspondiente al 97.2, 104.3 y 112.1% para los cultivares CP 72-2086, MEX 69-290 y MEX 79-431, respectivamente. El diámetro de tallo se redujo de acuerdo con la edad del cultivo y su media varió de 27.38 a 29.55 mm en el ciclo plantilla y de 25.41 a 27.83 en el ciclo soca. El diámetro de tallos disminuyó en 7.5% para MEX 69-290, 5.4% para CP 72-2086 y 6.1% para MEX 79-431, con respecto al ciclo plantilla. En el ciclo plantilla, el rendimiento de caña de azúcar a los 450 DDS siguió el siguiente orden de producción CP 72-2086 > MEX 79-431 > MEX 69-290 con 144.73, 130.09 y 94.18 t ha<sup>-1</sup>, respectivamente. Contrariamente, durante el ciclo soca a los 360 DDC, el cultivar MEX 69-290 presentó mayor rendimiento de tallos. En el ciclo soca, se observó una reducción del rendimiento de 14.5, 30.9 y 32.5% para los cultivares MEX 69-290, MEX 79-431 y CP 72-2086, respectivamente, en comparación al ciclo plantilla. La tasa de crecimiento absoluto máxima alcanzada por los cultivares evaluados fue de 187, 192 y 262 kg ha<sup>-1</sup> día<sup>-1</sup> a los 210 DDS en ciclo plantilla y 193, 177 y 151 kg ha<sup>-1</sup> día<sup>-1</sup> a los 180 DDC en el ciclo soca para MEX 69-290, CP 72-2086 y MEX 79-431, respectivamente. El índice de cosecha cercano a 0.70 demostró que el cultivar produjo más tallos que hojas, lo cual desde un enfoque de productividad es benéfico. El índice de vegetación que presentó mayor correlación con el rendimiento de caña fue el porcentaje de cobertura, seguido del índice de área foliar. El uso de los datos generados permitió predecir la biomasa de tallos en los cultivares evaluados usando el modelo AquaCrop. Este modelo demostró ser útil y confiable para predecir la biomasa de tallos en caña de azúcar.

**Palabras clave:** variables biométricas, rendimiento, materia seca, calidad de jugo, índices de vegetación, modelo AquaCrop.

Analysis of the growth of sugarcane cultivars (*Saccharum officinarum*) in the Santa Rosalía of the Chontalpa Sugar Mill, Tabasco

José Izquierdo Hernández, Dr.  
Colegio de Postgraduados, 2021

### ABSTRACT

An experiment was established under storm conditions, in the supply area of Santa Rosalía of the Chontalpa Sugar Mill (ISRCH, for its acronym in Spanish), Tabasco, during the plant cycle 2017/2019 and ratoon cycle 2019/2020, with three cultivars MEX 69-290, MEX 79-431 and CP 72-2086 and three repetitions of each plantation and in each cycle, established in a Fluvisol eutric soil. Within each plot five observation sites of 30 x 30 m were established, in which biometric measurements, biomass, juice quality and vegetation indices were carried out. Cultivars MEX 79-431 and MEX 69-290, respectively, presented the highest and lowest number of suckers during the two evaluated cycles. The highest number of suckers ( $15.27 \text{ m}^{-1} \text{ L}$ ) during the plant cycle was observed at 120 days after sowing (DAS), while in the ratoon cycle it was recorded at 60 days after harvest (DAH) with  $24.1 \text{ suckers m}^{-1} \text{ L}$ . During the ratoon cycle, an increase in the number of suckers with respect to the plant cycle was observed, corresponding to 97.2, 104.3 and 112.1% for cultivars CP 72-2086, MEX 69-290 and MEX 79-431, respectively. The stem diameter was reduced according to the age of the crop and its mean varied from 27.38 to 29.55 mm in the plant cycle and from 25.41 to 27.83 in the ratoon cycle. The stem diameter decreased by 7.5% for MEX 69-290, 5.4% for CP 72-2086 and 6.1% for MEX 79-431, with respect to the plant cycle. In the plant cycle, the sugarcane yield at 450 DAS followed the following production order  $\text{CP 72-2086} > \text{MEX 79-431} > \text{MEX 69-290}$  with 144.73, 130.09 and  $94.18 \text{ t ha}^{-1}$ , respectively. On the contrary, during the ratoon cycle at 360 DAH, the cultivar MEX 69-290 presented higher stems yield. In the ratoon cycle, a yield reduction of 14.5, 30.9 and 32.5% was observed for the cultivars MEX 69-290, MEX 79-431 and CP 72-2086, respectively, compared to the plant cycle. The maximum absolute growth rate reached by the evaluated cultivars was 187, 192 and  $262 \text{ kg ha}^{-1} \text{ day}^{-1}$  at 210 DAS in the plant cycle and 193, 177 and  $151 \text{ kg ha}^{-1} \text{ day}^{-1}$  at 180 DAH in the ratoon cycle for MEX 69-290, CP 72-2086 and MEX 79-431, respectively. The harvest index close to 0.70 showed that the cultivar produced more stems than leaves, which from a productivity approach is beneficial. The vegetation index that presented the highest correlation with the sugarcane yield was the coverage percentage, followed by the leaf area index. The use of the data generated allowed predicting the stem biomass in the cultivars evaluated using the AquaCrop model. This model proved to be useful and reliable for predicting stem biomass in sugarcane.

**Keywords:** biometric variables, yield, dry matter, juice quality, vegetation indices, AquaCrop model.

## **DEDICATORIA**

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 mis hijos: José María y Sofía por alegrarme la vida, por ser mi fuente de inspiración, por ser la esperanza de mi vida, por los momentos de amor y ternura que les he robado por dedicarme a la elaboración de este trabajo. Hijos todo es pensando en ustedes, les 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. Saúl Sánchez Soto, Dr. Carlos F. Ortiz García y Dr. Glauber José De Castro Gava, por todas sus enseñanzas y consejos brindados durante esta etapa de mi formación profesional.

A los productores y 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.

## **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 mis estudios de doctorado.

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.

A mis asesores: Dr. David Jesús Palma López, Dra. Luz del Carmen Lagunes Espinoza 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.

Agradezco especialmente al Dr. Juan José Peña Cabriales quien durante prácticamente todo mi proceso de formación fungió como mi asesor y que por motivos de salud no pudo concluir este proceso.

Agradezco también de especial manera al Dr. José Antonio Vera Núñez por sus aportaciones en la mejora de este trabajo y por el apoyo y los consejos brindados durante la realización de mis estudios doctorales.

Al Grupo MASCAÑA y al proyecto COMPASS, dentro del cual tuvo lugar la realización del experimento de campo; a la Asociación Local de productores de caña de azúcar CNPR del Ingenio Santa Rosalía de la Chontalpa (ISRCH).

A la QFB. Ury López Martínez, encargada del laboratorio de campo del ISRCH y al personal que labora con ella, por su apoyo en la determinación de los parámetros de calidad de jugo de las muestras de caña de azúcar.

Al Instituto Agronómico de Campinas (IAC), a la unidad de investigaciones y desarrollo de Jau, Sao Paulo, Brasil y al Dr. Glauber José De Castro Gava por el conocimiento transmitido, por la amistad brindada, por permitirme, recibirme y apoyarme incondicionalmente durante mi estancia de investigación.

Al MC. Adolfo Bergamo Arlanch y familia por su apoyo y amistad brindada durante mi estancia de investigación.

Al Ing. Francisco Eduardo Murillo Hernández por su apoyo durante la etapa de muestreos en campo de este trabajo.

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.

## CONTENIDO

<b>RESUMEN</b> .....	iii
<b>ABSTRACT</b> .....	iv
<b>DEDICATORIA</b> .....	v
<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	vi
<b>CONTENIDO</b> .....	viii
<b>ÍNDICE DE CUADROS</b> .....	xii
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	xv
<b>1. INTRODUCCION</b> .....	1
<b>2. REVISIÓN DE LITERATURA</b> .....	2
2.1. El cultivo de la caña de azúcar.....	2
2.2. Fenología de la caña de azúcar.....	3
2.3. Requerimientos edafoclimáticos de la caña de azúcar.....	4
2.5. Pigmentos fotosintéticos en caña de azúcar.....	8
2.6. Análisis del crecimiento en caña de azúcar.....	10
2.6.1. Índice de área foliar.....	12
2.6.1.1. Área Foliar específica (AFE).....	15
2.6.2. Tasa de crecimiento absoluto (TCA).....	15
2.6.3. Tasa de Crecimiento Relativo (TCR).....	16
2.6.4. Tasa de crecimiento del cultivo (TCC).....	16
2.6.5. Tasa de asimilación neta (TAN).....	17
2.6.6. El índice de cosecha (IC).....	18
2.7. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI).....	18
2.7.1. Definición y fórmula del NDVI.....	18

2.7.2. Usos potenciales.....	19
2.7.3. Variaciones del NDVI y adquisición de imágenes satelitales .....	20
2.7.4. NDVI utilizando diversos sensores.....	22
2.8. Cobertura del dosel .....	23
2.9. Análisis biométricos y producción de biomasa .....	27
2.9.1. Datos biométricos .....	27
2.9.2. Producción de biomasa .....	28
2.9.3. Productividad del cultivo (TCH) .....	29
2.9.4. Determinación del índice de maduración (IM) .....	29
2.9.5. Acumulación de sacarosa.....	31
2.10. Sistema radicular del cultivo de caña de azúcar .....	32
2.10.1. Distribución y profundidad .....	34
2.11. Modelación en caña de azúcar .....	37
<b>3. OBJETIVOS .....</b>	<b>44</b>
3.1. Objetivo general.....	44
3.2. Objetivos particulares .....	44
3.3. Hipótesis.....	45
<b>4. MATERIALES Y MÉTODOS .....</b>	<b>46</b>
4.1. Sitio experimental .....	46
4.2. Manejo agronómico .....	46
4.3. Variables de estudio .....	47
4.3.1. Análisis nutrimental del cultivo de caña de azúcar.....	47
4.3.2. Variables biométricas del cultivo de caña de azúcar .....	48
4.3.3. Índices de vegetación.....	50
4.3.4. Productividad y tasas de crecimiento del cultivo.....	51

4.3.5. Calidad de jugo .....	52
4.3.6. Distribución de raíces.....	53
4.3.7. Simulación del rendimiento de los cultivares de caña de azúcar .....	54
<b>5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>57</b>
5.1. Comportamiento del clima y características del suelo .....	57
5.2. Análisis nutrimental de cultivares de caña de azúcar.....	66
5.3. Análisis biométrico .....	68
5.3.1. Número de hijuelos por metro lineal (No. m <sup>-1</sup> L) .....	68
5.3.2. Número de tallos (tallos m <sup>-1</sup> L) .....	70
5.3.3. Altura de tallo (m).....	73
5.3.4. Diámetro de tallo (mm).....	77
5.4. Rendimiento de tallos y acumulación de materia seca (t ha <sup>-1</sup> ).....	81
5.4.1. Rendimiento de tallos (t ha <sup>-1</sup> ).....	81
5.4.2. Materia seca de tallos (MST) .....	83
5.4.3. Materia seca de hojas (MSH).....	86
5.4.4. Materia seca total (MSTo) .....	89
5.4.5. Tasas de crecimiento e índice de cosecha .....	91
5.5. Índices de vegetación .....	96
5.5.1. Porcentaje de cobertura .....	96
5.5.2. Índice de área foliar (IAF).....	98
5.5.3. Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) .....	101
5.5.4. Relación entre índices de vegetación y rendimiento de cultivares de caña de azúcar .....	104
5.6. Calidad industrial de cultivares de caña de azúcar en ciclo plantilla .....	108
5.6.1. Grados Brix (°Brix) .....	108
5.6.2. Pol (%) .....	108

5.6.3. Pureza (%).....	109
5.6.4. Fibra (%) .....	111
5.6.5. Humedad (%) .....	112
5.6.6. Azúcares reductores (%) .....	113
5.7. Calidad industrial de cultivares de caña de azúcar en ciclo soca .....	115
5.7.1. Grados Brix .....	115
5.7.2. Pol (%) .....	117
5.7.3. Humedad (%) .....	118
5.7.4. Pureza (%).....	119
5.7.5. Fibra (%) .....	120
5.7.6. Azúcares reductores (%) .....	120
5.8. Distribución de la biomasa radicular de cultivares de caña de azúcar durante el ciclo plantilla.....	121
5.8.1. Materia seca de raíces .....	121
5.8.2. Resistencia a la penetración .....	126
5.9. Estimación del porcentaje de cobertura y rendimiento de cultivares de caña de azúcar a través del modelo AquaCrop .....	127
5.9.1. Porcentaje de cobertura .....	127
5.9.2. Biomasa de tallos (t ha <sup>-1</sup> ).....	133
<b>6. CONCLUSIONES</b> .....	140
<b>7. LITERATURA CITADA</b> .....	142

## ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Extracción de nutrimentos del suelo por el cultivo de caña de azúcar ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) de acuerdo al rendimiento de tallos molederos. ....	7
Cuadro 2. Parámetros de cultivo y valores usados para simular el porcentaje de cobertura del dosel (CC) y la biomasa de tallos a través del modelo AquaCrop en nueve parcelas comerciales del ISRCH. ....	55
Cuadro 3. Valores de referencia del índice de eficiencia de Nash y Sutcliffe (E). ....	56
Cuadro 4. Análisis nutrimental de tres cultivares (Cv) de caña de azúcar durante el ciclo de plantilla en el área de abastecimiento del Ingenio Santa Rosalía de la Chontalpa. ....	66
Cuadro 5. Análisis de la varianza (ANAVA) del número de hijuelos ( $\text{No. m}^{-1} \text{L}$ ) de tres cultivares (Cv) de caña de azúcar durante el ciclo plantilla. ....	68
Cuadro 6. Análisis de varianza del número de hijuelos ( $\text{No. m}^{-1} \text{L}$ ) de tres cultivares (Cv) de caña de azúcar durante el ciclo soca en el área de abastecimiento del Ingenio Santa Rosalía de la Chontalpa. ....	69
Cuadro 7. Análisis de varianza del número de tallos ( $\text{No. m}^{-1} \text{L}$ ) de tres cultivares (Cv) de caña de azúcar durante el ciclo plantilla y soca en el área de abastecimiento del Ingenio Santa Rosalía de la Chontalpa. ....	72
Cuadro 8. Análisis de varianza de la altura de tallos (m) de tres cultivares (Cv) de caña de azúcar durante el ciclo plantilla y soca en el área de abastecimiento del Ingenio Santa Rosalía de la Chontalpa. ....	75
Cuadro 9. Análisis de varianza del diámetro de tallos (mm) de tres cultivares (Cv) de caña de azúcar durante el ciclo plantilla y soca en el área de abastecimiento del Ingenio Santa Rosalía de la Chontalpa. ....	80
Cuadro 10. Rendimiento de tallos ( $\text{t ha}^{-1}$ ) de tres cultivares de caña de azúcar, durante el ciclo plantilla y soca, en el área de abastecimiento del Ingenio Santa Rosalía de la Chontalpa. ....	82
Cuadro 11. Materia seca de tallos ( $\text{t ha}^{-1}$ ) de tres cultivares de caña de azúcar, durante el ciclo plantilla y soca, en el área de abastecimiento del Ingenio Santa Rosalía de la Chontalpa. ....	85
Cuadro 12. Materia seca de hojas ( $\text{t ha}^{-1}$ ) de tres cultivares de caña de azúcar durante el ciclo plantilla y soca, en el área de abastecimiento del Ingenio Santa Rosalía de la Chontalpa. ....	88
Cuadro 13. Materia seca total ( $\text{t ha}^{-1}$ ) de tres cultivares de caña de azúcar, durante el ciclo plantilla y soca, en el área de abastecimiento del Ingenio Santa Rosalía de la Chontalpa. ....	90
Cuadro 14. Cobertura (%) de tres cultivares (Cv) de caña de azúcar, durante el ciclo plantilla y soca en el Ingenio Santa Rosalía de la Chontalpa. ....	97

Cuadro 15. Índice de área foliar de tres cultivares (Cv) de caña de azúcar durante el ciclo plantilla en el área de abastecimiento del Ingenio Santa Rosalía de la Chontalpa. ....	99
Cuadro 16. Índice de área foliar de tres cultivares (Cv) de caña de azúcar durante el ciclo soca en el área de abastecimiento del Ingenio Santa Rosalía de la Chontalpa. ....	101
Cuadro 17. Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) durante el ciclo plantilla de tres cultivares (Cv) de caña de azúcar en el área de abastecimiento del Ingenio Santa Rosalía de la Chontalpa. ....	102
Cuadro 18. Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) de tres cultivares (Cv) de caña de azúcar durante el ciclo soca en el área de abastecimiento del Ingenio Santa Rosalía de la Chontalpa. ....	104
Cuadro 19. Coeficientes de correlación de Pearson (r) y probabilidad entre índices de vegetación y rendimiento del cultivar de caña de azúcar MEX 69-290, durante los ciclos de cultivo de plantilla y de soca. ....	105
Cuadro 20. Coeficientes de correlación de Pearson (r) y probabilidad entre índices de vegetación y rendimiento del cultivar de caña de azúcar CP 72-2086, durante los ciclos de cultivo de plantilla y de soca. ....	106
Cuadro 21. Coeficientes de correlación de Pearson (r) y probabilidad entre índices de vegetación y rendimiento del cultivar de caña de azúcar MEX 79-431, durante los ciclos de cultivo de plantilla y de soca. ....	107
Cuadro 22. Calidad de jugo de tres cultivares de caña de azúcar (Cv) durante el ciclo plantilla, en el área de abastecimiento de Ingenio Santa Rosalía de la Chontalpa. ....	110
Cuadro 23. Coeficientes de correlación de Pearson y probabilidades, entre variables de la calidad de jugo de tres cultivares de caña de azúcar durante el ciclo plantilla en el área de abastecimiento del Ingenio Santa Rosalía de la Chontalpa. ....	115
Cuadro 24. Calidad industrial de tres cultivares de caña de azúcar en el ciclo soca en el área de abastecimiento del Ingenio Santa Rosalía de la Chontalpa. ....	116
Cuadro 25. Distribución vertical (DV) y horizontal (DH) de materia seca de raíces (g dm <sup>3</sup> ) de tres cultivares (Cv) de caña de azúcar en el área de abastecimiento del Ingenio Santa Rosalía de la Chontalpa. ....	122
Cuadro 26. Porcentaje de distribución vertical (DV) y horizontal (DH) de biomasa seca radicular para tres cultivares (Cv) de caña de azúcar durante el ciclo plantilla, en la zona de abastecimiento del Ingenio Santa Rosalía de la Chontalpa. ....	124
Cuadro 27. Distribución vertical (DV) y horizontal (DH) de la resistencia a la penetración (MPa) del suelo cultivado con tres cultivares (Cv) de caña de azúcar en el área de abastecimiento del Ingenio Santa Rosalía de la Chontalpa. ....	127

Cuadro 28. Relación entre el porcentaje de cobertura (CC) medido con la aplicación Canopeo (observado) y el simulado a través del modelo AquaCrop en nueve parcelas comerciales durante el ciclo plantilla. ....	128
Cuadro 29. Relación entre el porcentaje de cobertura (CC) medido con la aplicación Canopeo (observado) y el simulado a través del modelo AquaCrop en nueve parcelas comerciales durante el ciclo soca. ....	130
Cuadro 30. Relación entre la biomasa de tallos observada y la simulada a través del modelo AquaCrop en nueve parcelas comerciales de caña de azúcar, durante el ciclo plantilla. ....	134
Cuadro 31. Relación entre la biomasa de tallos observada y la simulada a través del modelo AquaCrop en nueve parcelas comerciales de caña de azúcar, durante el ciclo soca. ....	135

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Desarrollo fenológico del cultivo de la caña de azúcar .....	4
Figura 2. Esquema de muestreo de raíces en la mitad del polígono de Voronoi por el método del monolito (a) y por el método de la sonda (b), los números representan los puntos de muestreo con la sonda. ....	38
Figura 3. Datos climáticos mensuales obtenidos de dos estaciones climáticas automatizadas, instaladas en el área de abastecimiento del Ingenio Santa Rosalía de la Chontalpa, durante las zafras 2018/2019 y 2019/2020. A) Ejido Zapotal, Cárdenas y B) R/a. El Huiral, Huimanguillo, Tabasco. ....	59
Figura 4. Descripción de perfil representativo de un suelo fluvisol éutrico en el área de abastecimiento del Ingenio Santa Rosalía de la Chontalpa. CE= conductividad eléctrica, MO= materia orgánica, CIC= capacidad de intercambio catiónico, Ac= Acidez intercambiable, Da= densidad aparente, FAL= franco arcilloso limoso, A= arcilla. ....	61
Figura 5. Descripción de perfil representativo de un suelo fluvisol éutrico en el área de abastecimiento del Ingenio Santa Rosalía de la Chontalpa. CE= conductividad eléctrica, MO= materia orgánica, CIC= capacidad de intercambio catiónico, Ac= Acidez intercambiable, Da= densidad aparente, FA= franco arcilloso, Far = franco arenoso. ....	63
Figura 6. Descripción de perfil representativo de un suelo fluvisol éutrico en el área de abastecimiento del Ingenio Santa Rosalía de la Chontalpa. CE= conductividad eléctrica, MO= materia orgánica, CIC= capacidad de intercambio catiónico, Ac= Acidez intercambiable, Da= densidad aparente, FL= franco limoso, FA= franco arcilloso. ....	65
Figura 7. Línea de tendencia del número de hijuelos ( $m^{-1} L$ ) para tres cultivares de caña de azúcar, durante el ciclo plantilla (A) y soca (B), en el área de abastecimiento del Ingenio Santa Rosalía de la Chontalpa. ....	70
Figura 8. Línea de tendencia del número de tallos ( $m^{-1} L$ ) para tres cultivares de caña de azúcar, durante el ciclo plantilla (A) y soca (B), en el área de abastecimiento del Ingenio Santa Rosalía de la Chontalpa. ....	73
Figura 9. Línea de tendencia de la altura de tallos para tres cultivares de caña de azúcar, durante el ciclo plantilla (A) y soca (B), en el área de abastecimiento del Ingenio Santa Rosalía de la Chontalpa. ....	76
Figura 10. Tasa de elongación de tallos (TET) de tres cultivares de caña de azúcar, durante el ciclo plantilla (A) y soca (B) en la zona de abastecimiento del Ingenio Santa Rosalía de la Chontalpa. ....	77
Figura 11. Línea de tendencia del diámetro de tallos (mm) para tres cultivares de caña de azúcar, durante el ciclo plantilla (A) y soca (B), en el área de abastecimiento del Ingenio Santa Rosalía de la Chontalpa. ....	79

Figura 12. Línea de tendencia del rendimiento de tallos ( $t\ ha^{-1}$ ) de tres cultivares de caña de azúcar durante el ciclo plantilla (A) y soca (B) en el área de abastecimiento del Ingenio Santa Rosalía de la Chontalpa. ....	83
Figura 13. Línea de tendencia sigmoidea y dinámica de acumulación de materia seca de tallos ( $t\ ha^{-1}$ ) de tres cultivares de caña de azúcar durante el ciclo plantilla (A) y soca (B) en el área de abastecimiento del Ingenio Santa Rosalía de la Chontalpa. ....	86
Figura 14. Línea de tendencia sigmoidea y dinámica de acumulación de materia seca de hojas ( $t\ ha^{-1}$ ) de tres cultivares de caña de azúcar durante el ciclo plantilla (A) y soca (B) en el área de abastecimiento del Ingenio Santa Rosalía de la Chontalpa. ....	89
Figura 15. Línea de tendencia sigmoidea y dinámica de acumulación de materia seca total ( $t\ ha^{-1}$ ) de tres cultivares de caña de azúcar durante el ciclo plantilla (A) y soca (B) en el área de abastecimiento del Ingenio Santa Rosalía de la Chontalpa. ....	91
Figura 16. Tasa de crecimiento absoluto (TCA), de tres cultivares de caña de azúcar durante el ciclo plantilla (A) y soca (B) en el área de abastecimiento del Ingenio Santa Rosalía de la Chontalpa. ....	93
Figura 17. Tasa de crecimiento del cultivo (TCC), de tres cultivares de caña de azúcar durante el ciclo plantilla (A) y soca (B) en el área de abastecimiento del Ingenio Santa Rosalía de la Chontalpa. ....	94
Figura 18. Tasa de crecimiento relativo (TCR), de tres cultivares de caña de azúcar durante el ciclo plantilla (A) y soca (B) en el área de abastecimiento del Ingenio Santa Rosalía de la Chontalpa. ....	95
Figura 19. Índice de cosecha (IC) de tres cultivares de caña de azúcar durante el ciclo plantilla (A) y soca (B) en el área de abastecimiento del Ingenio Santa Rosalía de la Chontalpa. ....	95
Figura 20. Línea de tendencia sigmoidea y dinámica del porcentaje de cobertura de tres cultivares de caña de azúcar durante el ciclo plantilla (A) y soca (B) en el área de abastecimiento del Ingenio Santa Rosalía de la Chontalpa. ....	98
Figura 21. Línea de tendencia y dinámica del índice de área foliar (IAF) de tres cultivares de caña de azúcar durante el ciclo plantilla (A) y soca (B) en el área de abastecimiento del Ingenio Santa Rosalía de la Chontalpa. ....	100
Figura 22. Línea de tendencia sigmoidea y dinámica del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) de tres cultivares de caña de azúcar durante el ciclo plantilla (A) y soca (B) en el área de abastecimiento del Ingenio Santa Rosalía de la Chontalpa. ....	103
Figura 23. Dinámica de acumulación de °Brix y Pol (%) de los cultivares de caña de azúcar MEX 69-290, MEX 79-431 y CP 72-2086, durante el ciclo plantilla, en el área de abastecimiento de Ingenio Santa Rosalía de la Chontalpa. ....	111

Figura 24. Dinámica del porcentaje de (A) pureza y (B) fibra de tres cultivares de caña de azúcar durante el ciclo plantilla en el área de abastecimiento del Ingenio Santa Rosalía de la Chontalpa. ....	113
Figura 25. Dinámica del porcentaje de humedad (A) y azúcares reductores (B) de tres cultivares de caña de azúcar durante el ciclo plantilla en el área de abastecimiento del Ingenio Santa Rosalía de la Chontalpa. ....	115
Figura 26. Dinámica de °Brix (A) y porcentaje de pol (B) de tres cultivares de caña de azúcar durante el ciclo soca en el área de abastecimiento del Ingenio Santa Rosalía de la Chontalpa. .	117
Figura 27. Dinámica del porcentaje de humedad (A) y pureza (B) de tres cultivares de caña de azúcar durante el ciclo soca en el área de abastecimiento del Ingenio Santa Rosalía de la Chontalpa. ....	119
Figura 28. Dinámica del porcentaje de fibra (A) y azúcares reductores (B) de tres cultivares de caña de azúcar durante el ciclo soca en el área de abastecimiento del Ingenio Santa Rosalía de la Chontalpa. ....	121
Figura 30. Relación entre el porcentaje de cobertura medido con la aplicación Canopeo (observado) y el simulado a través del modelo AquaCrop en tres cultivares de caña de azúcar durante el ciclo plantilla. ....	132
Figura 31. Relación entre el porcentaje de cobertura medido con la aplicación Canopeo (observado) y el simulado a través del modelo AquaCrop en tres cultivares de caña de azúcar durante el ciclo soca. ....	133
Figura 32. Relación entre la biomasa de tallos observada y la simulada a través del modelo AquaCrop en tres cultivares de caña de azúcar durante el ciclo plantilla. ....	138
Figura 33. Relación entre la biomasa de tallos observada y la simulada a través del modelo AquaCrop en tres cultivares de caña de azúcar durante el ciclo soca. ....	139

## 1. INTRODUCCION

A nivel estado, el Ingenio Santa Rosalía ubicado en la región de la Chontalpa (ISRCH) es el segundo en importancia en el estado de Tabasco, con una superficie cultivada de 12,248 ha, y con rendimiento de caña de  $56.5 \text{ t ha}^{-1}$ , comparativamente menor a la media de la región sureste de  $63.2 \text{ t ha}^{-1}$  y a la media nacional de  $65.1 \text{ t ha}^{-1}$ . Durante la zafra 2019-2020 molió 790,000 t de caña, y obtuvo un rendimiento de fábrica de 10.5%, el cual, también es menor a la media nacional de 11.15% (Cañeros, 2020). La productividad de un cultivo comienza a definirse desde el inicio del ciclo de producción comercial, y es afectada por múltiples factores, propios del genotipo, del ambiente, de las prácticas y condiciones de manejo del cultivo (Körner, 2015). La interacción del cultivo de caña de azúcar con factores ambientales durante el crecimiento modula su productividad. Por ello, la mejor comprensión de tales interacciones puede obtenerse mediante el análisis cuantitativo del crecimiento y de mediciones biométricas durante el desarrollo del cultivo, lo que permite el uso de índices fisiológicos para determinar las diferencias entre cultivares y modelar su crecimiento con diferentes prácticas de manejo y en distintos ambientes de producción (Freire *et al.*, 2010).

La evaluación de algunas variables morfológicas como altura, diámetro, densidad de plantas, área foliar, tasa de crecimiento y el rendimiento, hace posible la identificación de la capacidad productiva de diferentes cultivos y cultivares y también de analizar los efectos del manejo del cultivo adoptado sobre una especie (Gava *et al.*, 2001; De Oliveira *et al.*, 2010; Marafon, 2012; Torres *et al.*, 2015). Así, la identificación de las probables variaciones en el desarrollo de la caña de azúcar que ocurren durante el ciclo de cultivo, es fundamental para que se pueda modelar y cuantificar el crecimiento en los diferentes ambientes de producción (Teruel *et al.*, 1997; Silva *et al.*, 2012a; Bravo-Mosqueda *et al.*, 2014; Sexton y Everingham, 2014). El análisis de crecimiento

se ha establecido como una disciplina relacionada con la ecofisiología y la agronomía, con sus propios conceptos, términos y herramientas de estimación (Poorter y Sack, 2012) constituyendo una vía para el conocimiento de la fisiología de las plantas, que permite comprender la relación entre el crecimiento y la productividad de diferentes cultivos (Blanco *et al.*, 2003) y sirviendo como base del desarrollo de modelos de crecimiento generales (Fourcaud *et al.*, 2008).

Para analizar el crecimiento de cultivares de caña de azúcar se deben obtener valores primarios que nos permitan evaluarlos, para ello es necesario obtener datos de variables biométricas del cultivo como son: número, altura y diámetro de tallos, valores de índices de vegetación (índice de área foliar, porcentaje de cobertura del dosel, entre otros), datos de rendimiento y/o productividad, así como la calidad industrial de los cultivares y demás variables del cultivo.

Los cultivares de caña de azúcar principalmente cultivados en el estado de Tabasco, México son: MEX 69-290, MEX 79-431, MEX 68-P23, ITV 92-1424, ITV 92- 373, MEX 57-473, ATEMEX 96-40. Además de cultivares extranjeros como CP 72-2086, CP 72-1210, RD 75-11, SP 70-1284, MY 5514, entre otras (Salgado *et al.*, 2013), de los cuales se tiene poca información sobre sus características fisiológicas, técnicas y de rendimiento en diversos suelos y ambientes.

## **2. REVISIÓN DE LITERATURA**

### **2.1. El cultivo de la caña de azúcar**

La caña de azúcar es un cultivo de clima tropical y subtropical, cuyo centro de origen es Nueva Guinea, desde donde se esparció a Asia, a las islas del Pacífico y posteriormente a otros países. A finales del siglo XV fue traída a América por Cristóbal Colón (Rosas *et al.*, 2010).

A nivel mundial, la caña de azúcar es el cultivo sacarífero más importante, representa el 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. Esencialmente es considerada una planta

tropical, aunque se desarrolla bien en las regiones subtropicales. Es un cultivo de larga duración y se desarrolla 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. En un estudio realizado por Vázquez-Navarrete *et al.* (2019), se destacó que durante el periodo 2003-2017, la actividad cañera se desarrolló en 15 entidades federativas y 262 municipios, generando un valor de producción primaria de alrededor de \$38,412 millones anuales, con un rendimiento promedio de 84.05 t ha<sup>-1</sup>. Este rendimiento representó un incremento del 5% a nivel nacional durante ese periodo, atribuido a un incremento del 23% en superficie cosechada y volumen de producción. El valor de la producción aumentó 61%, y el precio promedio pagado al productor tuvo un crecimiento de 34% (\$689.8 t<sup>-1</sup>), el ingreso unitario en consecuencia también creció un 40%.

A nivel mundial, México fue el sexto productor de caña de azúcar (56.9 millones de t) y también el sexto exportador de azúcar a nivel mundial (USD\$723.9 millones) con una balanza comercial superavitaria de USD\$671.1 millones (Baez-Gonzalez *et al.*, 2018; FAO, 2019).

## **2.2. Fenología de la caña de azúcar**

Las etapas fenológicas del cultivo de caña de azúcar, después de la siembra, son: a) la germinación, cuando se forma el sistema radicular y emergen los primeros tallos y hojas, b) el amacollamiento y desarrollo del dosel, desde el segundo hasta el quinto mes cuando los tallos secundarios brotan, c) el crecimiento y acumulación de biomasa en tallos, entre el quinto y octavo mes; y finalmente d) la maduración de tallos y concentración de sacarosa (Figura 1). El contenido de sacarosa, a partir del cual se produce el bioetanol y el azúcar, se concentra en el tallo de la caña de azúcar (Molijn *et al.* 2018).

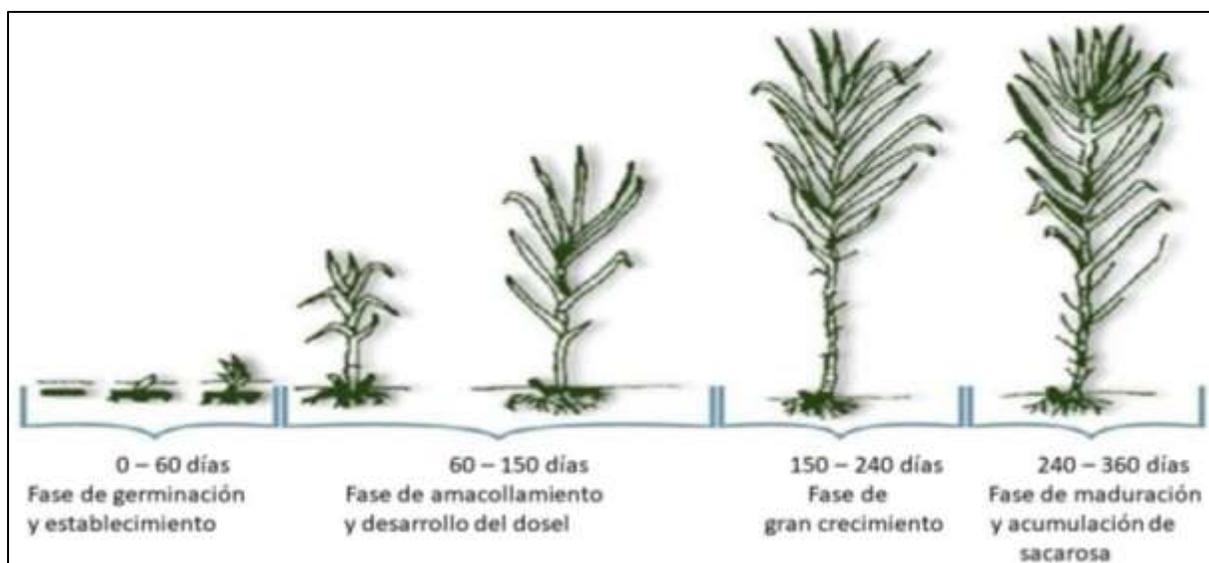


Figura 1. Desarrollo fenológico del cultivo de la caña de azúcar.

### 2.3. Requerimientos edafoclimáticos de la caña de azúcar

El rendimiento meta del cultivo de caña de azúcar, depende de la interacción de distintos componentes del rendimiento, cuya magnitud se define a través de las etapas fenológicas y fisiológicas durante el ciclo de cultivo en interacción con los factores ambientales, el manejo del cultivo y el potencial productivo de cada cultivar. La producción final de azúcar depende de la influencia de los factores ambientales durante la zafra y de la eficiencia con que se realice la cosecha y el procesamiento a nivel fábrica (Romero *et al.*, 2009).

La caña de azúcar crece satisfactoriamente en una gama 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. Esta planta tolera un amplio rango de acidez y alcalinidad del suelo (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. Además, requiere 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 desarrollar en 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 pluvial (PP), radiación, viento, heladas y granizadas, los dos últimos no son problema del trópico, pero sí de otras latitudes (Salgado *et al.*, 2013a).

La temperatura y 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 20°C el crecimiento disminuye notoriamente y, si la temperatura se reduce más, el crecimiento prácticamente se detiene (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 muestran signos de marchitez, aunque exista una buena reserva de agua en el suelo. Las variaciones de temperatura nocturna y diurna influyen en el amacollamiento, cuando estas variaciones se presentan y el valor promedio es de 26°C, este proceso se favorece; sin embargo, se reduce cuando los valores promedio son menores a 21°C (Salgado *et al.*, 2013a).

La caña de azúcar produce una gran cantidad de biomasa y requiere consumos sustanciales de agua y nutrientes para generar los máximos rendimientos (Wiedenfeld, 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.*, 2011).

En el estado de Tabasco, la PP anual promedio fluctúa entre láminas ligeramente mayores a 1,500 mm en las costas incrementándose hasta 3,500 mm hacia la sierra. Para el período de 1941 a 1996 la precipitación promedio anual fue de 2,432.7 mm (Moguel y Molina-Enríquez, 2000). Considerando esta información y el consumo anual de agua por el cultivo de caña de azúcar se puede concluir que, en Tabasco no se requiere riego; sin embargo, en el estado existen periodos de sequía donde el riego de auxilio se hace necesario para mantener la producción de los cultivos, ya que la distribución estacional de la PP no es uniforme durante el año. Además, la época seca en el estado de Tabasco concuerda con la época de mayor radiación solar la cual no puede ser aprovechada por el cultivo debido precisamente a la falta de humedad en el suelo (Salgado, 2011), considerando que la zafra de caña de azúcar en Tabasco inicia en el mes de diciembre y que la etapa de amacollamiento de los rebrotes coincide con la época de menor PP. En este sentido y en función de la distribución de la PP en el estado de Tabasco, tres épocas pueden distinguirse desde el punto de vista pluviométrico: lluviosa, de “nortes” y seca (Moguel y Molina-Enríquez, 2000).

#### **2.4. Requerimientos nutricionales**

El cultivo de caña de azúcar demanda altas cantidades de nitrógeno (N) y potasio (K), y aunque de este último nutrimento se encuentran cantidades importantes en los suelos cañeros de Tabasco, no por eso se debe no considerar en los programas de fertilización, de lo contrario, con el tiempo se agotan las reservas de K del suelo. El K está relacionado con la calidad de los jugos en la caña de azúcar (Valdez *et al.*, 2008). Al respecto, las reservas nutrimentales del suelo son fundamentales para el abastecimiento o extracción de los mismos por el cultivo de caña de azúcar (Cuadro 1).

Los nutrimentos requeridos por la planta de caña de azúcar son 17 y pueden ser considerados en tres grupos: los elementos no minerales (C, H y O), los macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg y S) requeridos en concentraciones mayores a 500 mg kg<sup>-1</sup> de materia seca (Rengel *et al.*, 2011a) y los

micronutrientes (Fe, Zn, B, Cu, Cl, Mn, Mo, y Ni) que son utilizados en concentraciones menores a 50 mg kg<sup>-1</sup> de materia seca (Rengel *et al.*, 2011b).

Cuadro 1. Extracción de nutrimentos del suelo por el cultivo de caña de azúcar (kg ha<sup>-1</sup>) de acuerdo al rendimiento de tallos molederos.

Elementos	Nutrimento	Rendimiento (t ha <sup>-1</sup> )	
		97.0	94.0
		Mex 57-453	Mex 68-P23
Nitrógeno	N	148.67	70.00
Fósforo	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	98.84	76.00
Potasio	K <sub>2</sub> O	431.64	354.00
Calcio	Ca	110.30	49.27
Magnesio	Mg	67.13	33.18
Hierro	Fe	10.02	5.20
Manganeso	Mn	0.15	1.06
Zinc	Zn	0.43	0.73
Cobre	Cu	Trazas	Trazas

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

Cada nutrimento tiene una función específica en el crecimiento y desarrollo de la planta, por ejemplo, el K está relacionado con la calidad de los jugos en la caña de azúcar. La deficiencia o abundancia de uno o más de uno de estos nutrientes 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).

El requerimiento de nutrimentos por la planta de caña de azúcar varía según el cultivar, el suelo, las condiciones climáticas y el manejo del cultivo. Así, los requerimientos de N entre cultivares son diferentes. Al respecto, Salgado *et al.* (2017), al evaluar el consumo de N de 10 cultivares de caña de azúcar durante el ciclo plantilla, agruparon los cultivares no fertilizados, en cuatro grupos, de acuerdo con el rendimiento de tallos molibles y al índice de eficiencia interna de nitrógeno (IE): Grupo I: Cultivar COLPOSCTMEX-06-271 de bajo rendimiento y bajo IE (>1.7 kg N t<sup>-1</sup> de caña producida), Grupo II: Cultivares CP 72-1210 y MEX 69-290 de bajo rendimiento y medio IE (1.7

a 1.9 kg N t<sup>-1</sup> de caña producida), Grupo III: cultivares RD 75-11, ATEMEX 96-40, COLPOSCTMEX 06-039, y COLPOSCTMEX 06-2362 de alto rendimiento y bajo IE y Grupo IV: Cultivares COLPOSCTMEX 05-223, MEX 68-P-23, y COLPOS-06-474 con alto rendimiento y medio IE. Por otra parte, Melgar *et al.* (2012) concluyeron que el cultivar CG 96-59 requiere más N que otros cultivares con 1.19 kg N t<sup>-1</sup> caña, mientras que CP 72-2086 se considera intermedia con una extracción de 1 kg N t<sup>-1</sup> caña. 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<sup>-1</sup> caña.

Los períodos críticos de absorción de micronutrientes se ubican en las etapas vegetativa y 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<sup>-1</sup>, respectivamente, en el cultivar RB-85-5035 (Rengel *et al.*, 2011).

## **2.5. Pigmentos fotosintéticos en caña de azúcar**

La clorofila es el pigmento principal de captura de la energía lumínica para la fotosíntesis, absorbe en longitudes de onda del espectro excepto longitudes 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 principales de clorofilas, la clorofila “a” y la clorofila “b” (Rivas, 2000). La clorofila “a” absorbe su energía en longitudes de onda correspondientes a los colores que oscilan 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 en el rango de longitud de onda de 400 a 700 nm (Hopkins y Hüne, 2004).

La determinación de clorofila en tejidos vegetales (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 N, Mg y Fe principalmente (Sachdchina y Dimitrieva, 1995), y también puede ser usado como un indicador potencial del grado de estrés, ya que tiene un papel directo en la captura de luz y el inicio de transporte de electrones para la generación de energía (ATP y NADPH) necesaria para la fijación de CO<sub>2</sub> durante el proceso fotosintético (Zarco-Tejada, 2002). El contenido relativo de clorofila es determinado usando un medidor de clorofila portátil (SPAD 502).

Silva *et al.* (2008) 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, al separar 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 y TCP 02-4624) y el clon susceptible (L 01-283), en el cual la degradación de la clorofila fue irreversible al restablecer el riego.

Respecto a la relación entre el contenido de N foliar y la cantidad relativa de clorofila a través de valores SPAD, Do Amaral y Molin (2011), observaron una baja correlación. Resultados similares fueron reportados por Izquierdo-Hernández *et al.* (2016) en Tabasco, México, quienes determinaron que 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 ( $p \leq 0.01$ ), además no se encontró diferencia significativa entre las unidades SPAD y dosis variables de N.

En la fase de maduración (durante y después del período de NDVI máximo), se estimó una relación lineal entre el NDVI derivado de las imágenes SPOT y los valores SPAD. Esta alta relación ( $r^2 = 0.79$ ) es válida para una gama de valores SPAD, de 10 a 40. Los valores de 40 correspondieron a hojas muy verdes (dosel irrigado y sano) mientras que los valores SPAD de 10 correspondieron a hojas senescentes. Esto se debe a que, durante la etapa de maduración, las hojas son más o menos senescentes y generalmente se vuelven amarillentas debido a la degradación de la clorofila. Este cambio de color tiene un impacto en las reflectancias en las bandas visibles, lo que lleva a una disminución en los valores de NDVI (Begue *et al.*, 2010).

## **2.6. Análisis del crecimiento en caña de azúcar**

El análisis de crecimiento se considera el método estándar para medir la productividad biológica en las especies vegetales (De Oliveira *et al.*, 2010), ya que, permite el estudio de diferentes cultivares de un cultivo en diversos ambientes de producción (De Oliveira *et al.*, 2005).

De acuerdo con Torres *et al.* (2015), el análisis del crecimiento se ha establecido como un método estándar para estimar la producción fotosintética neta de plantas y de comunidades de plantas en muchas partes del mundo, y representa la primera etapa en el análisis de la producción primaria

La caña de azúcar crece lentamente durante la primera parte de su período de crecimiento, sobre todo en el ciclo plantilla en comparación con otros cultivos de gramíneas de clima cálido (Allison *et al.*, 2007). Por ello, de acuerdo con Begue *et al.* (2010), es crucial la comprensión de la fisiología del cultivo y las prácticas de manejo de la caña de azúcar, para el éxito de las aplicaciones de teledetección en las predicciones del rendimiento. Durante el crecimiento del cultivo, la evaluación de variables morfológicas de las plantas, como altura, diámetro, número de plantas por metro

lineal, área foliar y producción, permite definir la capacidad productiva de diferentes cultivos y cultivares y también de analizar los efectos del manejo del cultivo (De Oliveira *et al.*, 2010).

El análisis de crecimiento de un cultivo puede ser realizado mediante evaluaciones secuenciales de la acumulación de materia seca y/o fresca a través de los índices fisiológicos (Gava *et al.*, 2001), con lo que se logra identificar las probables variaciones en el desarrollo de la caña de azúcar que ocurren durante el ciclo, información que es fundamental para que se pueda modelar y cuantificar el crecimiento en los diferentes ambientes de producción (Teruel *et al.*, 1997) y apoyar la toma de decisiones por el productor.

Generalmente, la estimación de la producción de la caña de azúcar se realiza al finalizar cada zafra y mediante estimaciones de rendimiento con anterioridad a la cosecha, basándose en la experiencia de técnicos, a través de observaciones de campo y muestreos, utilizando datos estadísticos de años anteriores, pero sin considerar la distribución espacial del área plantada y la variabilidad a diversos factores ambientales, lo que trae como consecuencia errores en los estimados de producción, principalmente en zonas agrícolas de gran heterogeneidad (Aguilar *et al.*, 2010).

Actualmente, el análisis cuantitativo del crecimiento del cultivo, complementado con análisis foliar y de datos de índices de vegetación obtenidos a través de imágenes satelitales o sensores, permite desarrollar los modelos de predicción del rendimiento de la caña de azúcar. De acuerdo con Lisboa *et al.* (2018), el enfoque del modelo de predicción basado en datos del NDVI y la concentración de nutrientes del tejido de la hoja recolectados en las primeras etapas del crecimiento del cultivo puede ayudar al sector de la caña de azúcar a predecir los rendimientos de los cultivos con manejo intensivo para la producción de bioenergía. Además, estos modelos pueden usarse para monitorear espacial y temporalmente los cambios en el rendimiento por la remoción de paja y

apoyar la toma de decisiones hacia un manejo más sostenible de los residuos de cosecha en caña de azúcar.

De acuerdo con Benincasa (2003), habiéndose obtenido la materia seca (MS) y el área foliar (AF) a intervalos regulares preestablecidos, pueden determinarse los parámetros del análisis de crecimiento: Tasa de crecimiento absoluta (TCA), Tasa de Crecimiento Relativo (TCR), Tasa Asimilatoria neta (TAN), Área Foliar Específica (AFE), Razón de Masa Foliar (RMF), Razón de Área Foliar (RAF), Índice de Área Foliar (IAF) y el índice de cosecha (IC).

### **2.6.1. Índice de área foliar**

El índice de área foliar (IAF), es considerado un 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 interceptación 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 el modelado del crecimiento, desarrollo y rendimiento agronómico de los cultivos (De Oliveira *et al.*, 2007). El IAF evalúa la capacidad o la velocidad con que las partes aéreas del vegetal ocupan el área de suelo disponible para aquel vegetal. Las hojas cubren el área disponible, aumentando gradualmente la capacidad del vegetal para aprovechar la energía solar. La interceptación de la luz por las hojas es influenciada por su tamaño, forma y ángulo de inserción (Marafon, 2012).

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 pudo estimar de manera no destructiva, rápida y con alta precisión, el área foliar por tallo del cultivar de caña de azúcar LCP 85-384, durante las distintas fases del ciclo del cultivo (Brito *et al.*, 2007).

Los valores de L y A se utilizan para calcular el área foliar (AF) y el índice de área foliar (IAF). El AF por tallo, se determina por medio del conteo del número de hojas verdes (hoja totalmente expandida con un mínimo del 50% de área verde, contada a partir de la hoja +1) y por las mediciones de la longitud y de la anchura de acuerdo con la metodología descrita por Hermann y Câmara (1999), aplicando la fórmula:  $AF = L \times A \times 0.75 \times (N + 2)$ , donde L es la longitud, A la anchura, N es el número de hojas verdes abiertas, 2 el factor de ponderación para las hojas que aún no están totalmente expandidas y 0.75 el factor de corrección para el cultivo. El AF tiene gran importancia para los valores de la fracción de la radiación fotosintéticamente activa interceptada, que puede ser afectada por el espaciamiento de plantación, tipo de ciclo (plantilla o soca), fecha de inicio del ciclo y el cultivar.

El IAF en caña de azúcar se puede obtener multiplicando el AF por el NTI (número de tallos molederos) y dividiendo este valor por el área de la superficie del terreno ocupada por las plantas (AS), a través de la expresión:  $IAF = (AF \times NTI) / AS$ . El IAF también puede ser obtenido a partir de mediciones hechas con un integrador de área foliar (Zarco-Tejada, 2002). El IAF es efectivo para evaluar el rendimiento final, siendo que los mayores valores durante el ciclo de desarrollo estarían relacionados con la mayor producción final de tallos (Sinclair *et al.*, 2004).

Actualmente, existen en el mercado, equipos portátiles con sensores integrados que permiten medir de manera no destructiva, el IAF en diferentes cultivos.

Al contrario de lo que se puede pensar, el IAF óptimo, no es aquel en que se obtiene una mayor producción de biomasa y, consecuentemente, la productividad máxima. Esto puede ser explicado por el hecho de que, a partir de un momento dado, el aumento en el IAF puede hacer que ocurra el auto-sombreado por las hojas, disminuyendo la eficiencia fotosintética de la planta. Generalmente el IAF óptimo ocurre en las primeras fases del crecimiento, cuando el sombreado y el auto-sombreado son mínimos. Un IAF cerca de 4 es suficiente para que la caña de azúcar intercepte el 95% de la radiación solar incidente (Machado *et al.*, 1985). En cuanto a la distribución espacial de las hojas, con relación a la interceptación de la radiación en la franja de lo visible, ocurre el cierre casi completo del dosel en IAF mayores que 4, siendo que, superficies foliares con IAF superiores, resultan en valores prácticamente no asimilatorios. Durante el amacollamiento, valores de IAF por encima de dos ya ocasionan la muerte de tallos, en función de la competencia por luz, ya que la cantidad de luz que atraviesa la capa de hojas que componen el dosel de la planta es de apenas 20 a 30% de la radiación solar incidente (Barbieri, 1993).

Considerando la importancia del área foliar en el monitoreo de cultivos agrícolas, como la caña de azúcar y las grandes extensiones de terreno este cultivo generalmente ocupa, las imágenes satelitales han ganado terreno en la estimación de diferentes índices de vegetación. Sin embargo, falta de información sobre la correlación entre las etapas de desarrollo y los índices de vegetación para determinar recomendaciones de manejo apropiadas y específicas en cada período del ciclo del cultivo (Liu, 2007).

En la Isla Reunión, Francia, el rango en los valores de IAF medidos fue particularmente amplio (de 0.1 a 7), y permitió construir una relación de escala de campo entre el NDVI derivado de las

imágenes SPOT y el IAF medido (sensor Licor LAI-2000). Esta relación solo se estableció para los datos adquiridos durante la fase de crecimiento del cultivo (antes y durante el período de NDVI máximo) y, por lo tanto, solo son válidos para el IAF verde. La correlación entre NDVI e IAF en campo fue alta ( $r^2 = 0.94$ ), exponencial, y comenzó a saturarse para valores IAF superiores a 3. El error cuadrático medio (RMSE) fue 0.98, lo que podría estar relacionado con a) la imprecisión en la estimación del IAF causada por las técnicas de muestreo de campo, y b) ruidos de configuración de visión solar que afectan a la señal radiométrica de satélite (Begue *et al.*, 2010).

#### **2.6.1.1. Área Foliar específica (AFE)**

El AFE es un indicador fisiológico que mide la proporción de hojas sobre la base de su peso seco (AF / MS hoja), puede disminuir sistemáticamente con el tiempo cuando la hoja madura, pero se incrementa sistemáticamente con la profundidad del follaje, cuando la disponibilidad de la luz para el desarrollo foliar y la interceptación disminuye. Se ha evidenciado que, para una iluminación determinada, las especies con hojas de mayor AFE (menor carbono invertido por unidad de área receptora) tendrán una mayor tasa de crecimiento relativo en peso (Hunt, 1990). El mismo autor menciona que este indicador se acepta como una medida de la densidad o del espesor relativo, porque trata de la relación entre el área de las hojas y su masa seca, por lo que sirve para estimar su espesor; es conocido que su incremento significa una disminución en el espesor y viceversa. Este grosor foliar, está determinado por el número y el tamaño de las células del mesófilo (Marafon, 2012).

#### **2.6.2. Tasa de crecimiento absoluto (TCA)**

La TCA, representa la ganancia de materia seca (MS) de una planta sin tener en cuenta el material inicial existente que dio origen a esa ganancia, es decir, es la variación o incremento entre

dos muestreos que indica la velocidad de crecimiento de la planta a lo largo del ciclo de cultivo.

Para determinarla se utiliza la ecuación siguiente (Marafon, 2012):

$$TCA (g \text{ día}^{-1}) = MS_2 - MS_1 / (t_2 - t_1)$$

Dónde:  $MS_1$  y  $MS_2$  representan la materia seca en los tiempos  $t_1$  y  $t_2$ .

### 2.6.3. Tasa de Crecimiento Relativo (TCR)

Es la medida más apropiada para la evaluación del crecimiento vegetal, y es dependiente de la cantidad de material acumulado gradualmente. Expresa el incremento en la masa de materia seca por unidad de masa inicial, en un determinado intervalo de tiempo (Marafon, 2012).

$$TCR (g \text{ g}^{-1} \text{ día}^{-1}) = (\ln MS_2 - \ln MS_1) / (t_2 - t_1)$$

Dónde:  $\ln$  = logaritmo natural;  $MS_1$  y  $MS_2$  = masas de materia seca en los tiempos  $t_1$  y  $t_2$ .

La TCR varía a lo largo del ciclo vegetal, dependiendo de otros dos factores del crecimiento: la razón de área foliar (RAF) y la tasa asimilación neta (TAN). Por lo tanto, la tasa de crecimiento relativo se puede obtener utilizando las ecuaciones:  $TCR = TAN \times RAF$ .

La TCR disminuye a medida que la planta crece en virtud del auto-sombreado de las hojas. En los cultivares más productivos, que generalmente desarrollan más rápidamente su IAF los valores de TCR son mayores. Por lo tanto, TCR ejerce una mayor influencia en la fase de desarrollo del área foliar. Cuando la planta alcanza un IAF relativamente alto, la correlación entre TCR y productividad económica, se reduce.

### 2.6.4. Tasa de crecimiento del cultivo (TCC)

Representa la cantidad total de materia seca acumulada por unidad de área de suelo (S), en un determinado tiempo. La TCC corresponde a la tasa de producción de materia seca de una comunidad vegetal, expresada en  $g \text{ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ , y se obtiene a través de la ecuación (Marafon, 2012):

$$TCC = (MS_2 - MS_1) / S / (t_2 - t_1)$$

Donde  $S$  es el área de muestreo ocupada por el cultivo ( $m^2$ ) en el terreno y  $MS_1$  y  $MS_2$ , las masas de materia seca en los tiempos iniciales ( $t_1$ ) y final ( $t_2$ ) de la evaluación. La TCC también puede ser obtenida por la expresión:  $TCC (g m^{-2} día^{-1}) = TAN \times IAF$

De acuerdo con Larcher y Prado (2000), una asociación de gramíneas C4, desarrollada en los trópicos y sub-trópicos, alcanza valores máximos para la TCC de 50 a 60  $g m^2 día^{-1}$ , durante el principal período de crecimiento. En el caso de la caña de azúcar, el máximo rendimiento obtenido por área puede alcanzar hasta 8 kilogramos de masa seca por metro cuadrado ( $kg m^{-2} día^{-1}$ ).

### 2.6.5. Tasa de asimilación neta (TAN)

También denominada Tasa de asimilación aparente (TAA). La TAN representa el incremento en masa de materia seca acumulada en la planta (MSP) por unidad de área foliar disponible (AF), durante un determinado intervalo de tiempo (Marafon, 2012). La TAN se calcula por sus valores medios mediante la siguiente expresión:

$$TAN (g m^{-2} día^{-1}) = (MS_2 - MS_1 / t_2 - t_1) \times (\ln AF_2 - \ln AF_1 / t_2 - t_1)$$

Dónde:  $MS_1$  y  $MS_2$  = masas de materia seca de la planta (g) en los tiempos  $t_1$  y  $t_2$  (días);  $AF_1$  y  $AF_2$  = áreas foliares de las plantas ( $dm^2$ ) en los tiempos  $t_1$  y  $t_2$  (días)  $\ln$  = logaritmo natural.

Los valores de la TAN son especialmente altos durante la fase de intenso crecimiento, que en el caso de las plantas C4, queda entre 40 y 80  $g m^2 día^{-1}$ . En este mismo grupo de plantas, la TAN media, durante todo el período de crecimiento, es de 20 y 30  $g m^2 día^{-1}$  (Larcher y Prado, 2000).

Según Magalhães (1985), la TAN refleja la dimensión del sistema asimilador que está involucrado en la producción de materia seca, o sea, es una estimación de la fotosíntesis neta. La TAN depende de factores ambientales, principalmente de la radiación solar. En el transcurso del crecimiento de una planta, su capacidad de producción aumenta (mayor IAF), pero su TAN disminuye en virtud del auto-sombreado. Sin embargo, de acuerdo con este autor, una planta con

baja TAN, no será necesariamente una planta poco productiva. El café y el cacao, por ejemplo, son plantas con bajas TAN, por tener bajo punto de compensación, o sea, incluso con poca energía solar recibida, la fotosíntesis es capaz de compensar perfectamente la demanda energética de la respiración.

#### **2.6.6. El índice de cosecha (IC)**

Es un cociente frecuentemente utilizado para medir la eficiencia de conversión de productos sintetizados en material de importancia económica. El IC se define como la razón entre la masa de materia seca de la fracción económicamente rentable (MS económica) y la biomasa seca total cosechada (MS total). Para el cultivo de caña de azúcar:  $IC = MS\ tallos / MS\ total$  (Marafon, 2012).

#### **2.7. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)**

El NDVI se considera un buen estimador de la biomasa, es usado en todo el mundo y ha resultado el índice verde más consistente para monitoreo de vegetación en los ambientes y situaciones más diversos; se utiliza ampliamente para evaluar de manera rápida, a escala regional, la productividad de los cultivos, con un nivel aceptable de precisión y tiene correlación con el contenido de humedad de la planta y puede ser aplicado incluso, en la agricultura de precisión, en el manejo de los cultivos, debido a que las observaciones espectrales del follaje pueden usarse para monitorear las variaciones del crecimiento y como indicadores del estrés al que está sometido el cultivo (Xavier, 2004).

##### **2.7.1. Definición y fórmula del NDVI**

El índice de vegetación de diferencia normalizada El NDVI, es una transformación numérica de las bandas espectrales visibles en rojo (RED) e infrarrojo cercano (NIR) que toma la siguiente forma (Wiegand *et al.*, 1991):

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$$

El NDVI representa una medida radiométrica adimensional que obtiene una respuesta diferente de la longitud de onda incidente en el rojo visible (absorbido por la clorofila) y la radiación en el infrarrojo cercano (NIR) (que se refleja en la capa mesofílica de las hojas) con el dosel de vegetación. Se correlaciona con la abundancia relativa y la condición de la vegetación verde (Brown y De Beurs, 2008).

El NDVI asocia la porción de radiación electromagnética relacionada con la cantidad de biomasa (NIR) y la porción de radiación electromagnética relacionada con la actividad de los pigmentos fotosintéticos (VIS) de las plantas (Jackson y Huete, 1991; Wiegand *et al.*, 1991). Algunos estudios de NDVI se han utilizado con éxito para evaluaciones en caña de azúcar, como clasificación del área, identificación de cultivares, detección de enfermedades y predicción del rendimiento (Rudorff *et al.*, 2010).

### **2.7.2. Usos potenciales**

Las bandas espectrales Landsat Thematic Mapper 3 y 4, son adecuadas para detectar, cuantificar y discriminar el cultivo de caña de otras coberturas, y el NDVI ha demostrado ser un parámetro eficaz e instrumento de evaluación rápida del estado de vigor del cultivo en un momento determinado, y con ello vigilar la variabilidad temporal que determina la interacción del cultivo con otros factores agroclimáticos y, por lo tanto, modelar la productividad agrícola (Aguilar *et al.*, 2010), dichos autores describieron un NDVI que varió de -0.3 a 0.3 al final de la zafra en la Huasteca Potosina.

El NDVI también puede detectar la variabilidad espacial de características del suelo combinando imágenes Landsat 5 / ETM + y NDVI. En 32 ha cultivadas con SP83-2847 en Itajobi

Sao Paulo, Brasil durante cinco ciclos de cosecha se observó un rango de variación en NDVI de 0.21 a 0.49, y los atributos que presentaron correlación espacial con el NDVI en el área de estudio, fueron arcilla y fósforo (Zanzarini *et al.*, 2013).

Lofton *et al.* (2012) demostraron que las lecturas de NDVI pueden usarse para estimar el rendimiento potencial (RP) de la caña de azúcar. El uso del grado de crecimiento diario (GCD), todos los días desde el comienzo del año (TDA) donde  $GCD > 0$ , no proporcionó resultados positivos como medida del tiempo debido a la rápida acumulación de días al comienzo de la temporada de crecimiento, cuando el crecimiento es mínimo. Asimismo, se determinó que el plazo óptimo para estimar el RP de la caña de azúcar era de 601 a 750 GCD desde el comienzo del año calendario (CGCD). El ajuste de las lecturas de NDVI utilizando CGCD y TDA aumentó la precisión de los modelos de estimación del RP, pero solo el ajuste de CGCD aumentó la relación entre NDVI y el rendimiento de caña. El ajuste CGCD proporcionó una mejor predicción de RP de la caña de azúcar porque proporcionó una mejor estimación de la temperatura durante toda la temporada de crecimiento en comparación con el TDA. Además, la separación de cultivares basado en la estructura del dosel aumentó el valor de  $r^2$  del modelo de RP con los cultivares que se clasificaron como erectas; sin embargo, tuvo un efecto ligeramente negativo en la relación entre la reflectancia del dosel y el rendimiento de la caña de azúcar para los cultivares caídos o acamados. Esto se debió al rápido y temprano cierre del dosel en la temporada de crecimiento de los cultivares caídos (Lofton *et al.*, 2012).

### **2.7.3. Variaciones del NDVI y adquisición de imágenes satelitales**

Las variaciones en el NDVI, durante la etapa de crecimiento, se explican principalmente por variaciones en el IAF, y durante la etapa de maduración, por cambios en el color de las hojas (Begue *et al.*, 2010). El período de transición entre estas dos etapas generalmente corresponde al

NDVI máximo (entre 0.7 y 0.8) el cual, se alcanza aproximadamente dos meses antes de la cosecha. En este momento, al final del crecimiento del tallo, las tendencias de rendimiento del cultivo ya están establecidas, y el NDVI puede ser un buen indicador de biomasa. No utilizar este período, podría explicar los malos resultados al relacionar el NDVI o las reflectancias espectrales sin considerar las fechas de adquisición de imágenes en su contexto agronómico específico. Al respecto, se ha demostrado que los métodos para estimar el rendimiento en caña de azúcar utilizando valores de NDVI máximo y NDVI integrado dieron una raíz del error cuadrático medio (RECM o RMSE, por sus siglas en inglés) de 13.2 y 15.0 t ha<sup>-1</sup>, respectivamente, comparable a escala de campo (Begue *et al.*, 2010).

Ueno *et al.* (2005) concluyeron que el mejor período de adquisición de imágenes satelitales para evaluar el rendimiento de la caña de azúcar es aproximadamente dos meses antes del inicio de la cosecha. Almeida *et al.* (2006) recomendaron derivar la relación NDVI/rendimiento a los 8-10 meses de crecimiento.

Teóricamente con una sola observación, la fiabilidad de las imágenes como medio para estimar el rendimiento final disminuye cuanto más distante de la cosecha se obtiene la imagen, porque hay más tiempo para que factores, como la sequía o la deficiencia de nutrientes, influyan en el rendimiento. Sin embargo, la ventaja del método NDVI máximo es que puede usarse con solo unas pocas imágenes, incluso una sola imagen puede ser suficiente si se adquiere aproximadamente dos meses antes del comienzo de la temporada de cosecha cuando el crecimiento de los diferentes campos de caña ha alcanzado el máximo. Sin embargo, la relación no es lineal y puede no ser precisa para un rendimiento alto debido a la saturación de NDVI (Begue *et al.*, 2010).

#### 2.7.4. NDVI utilizando diversos sensores

La comparación entre los valores de NDVI calculados a través del software GreenSeeker y los hechos a partir de las imágenes registradas por el vehículo aéreo no tripulado (dron), en un trabajo realizado en plantaciones de caña panelera, no han mostrado variaciones importantes entre los dos tipos de valores calculados, debido a que los métodos son complementarios y varían solo los modelos (Rueda *et al.*, 2015). Los valores de NDVI reportados por dichos investigadores, variaron de 0.44 a 0.7 para el sensor GreenSeeker y de 0.41 a 0.68 para las imágenes satelitales.

En un estudio, se compararon los valores de NDVI de dos áreas experimentales, obtenidos con el sensor hiperespectral (FieldSpec Spectroradiometer) y las imágenes satelitales (CBERS-4). En el área 1, los valores de NDVI utilizando el sensor y las imágenes satelitales oscilaron entre 0.60 y 0.80 y entre 0.40 y 0.60, respectivamente. Sin embargo, en el área 2, los valores de NDVI fueron menores, oscilando entre 0.40 a 0.70 y 0.20 a 0.50 para el sensor y las imágenes de satélite, respectivamente. En promedio, los valores de NDVI estimados con ambas metodologías fueron 34% mayores en el área 1 que en el área 2. Aunque se encontró variación entre los valores de NDVI derivados de estos dos métodos, los resultados mostraron un patrón bastante similar en las variaciones del NDVI debido a las tasas de eliminación de paja. Entre los métodos de adquisición de datos para calcular el NDVI, la imagen satelital fue menos eficiente que el sensor hiperespectral para detectar los efectos de remoción de paja en el rendimiento de la caña de azúcar (Lisboa *et al.*, 2018).

Pereira *et al.* (2016) recomendaron la aplicación de corrección atmosférica en datos de reflectancia para estimar el NDVI, ya que aumenta la calidad de las correlaciones entre los datos espectrales y la superficie, encontrando errores del 11 al 43% entre datos de NDVI con y sin corrección atmosférica. Además, concluyeron que la variación temporal del IAF obtenida del

modelo NDVI corregido es satisfactorio, mostrando las etapas de crecimiento, estabilización y disminución de un ciclo de producción típico.

Zenteno *et al.* (2017) reportaron la estimación del rendimiento de caña de azúcar a partir de modelos lineales que requieren como dato de entrada valores del índice de vegetación (NDVI), índice de estrés de humedad (MSI, por sus siglas en inglés) y de evapotranspiración del cultivo (ETc). Observando una relación directa entre el rendimiento de caña de azúcar y los mencionados índices (estimados a partir de imágenes Landsat 7 ETM+). Las variaciones de los índices reproducen adecuadamente los cambios en el rendimiento de caña de azúcar. El valor de NDVI reportado por dichos investigadores varió de -0.1 (cuando aún no emerge la planta) a 0.70 con un dosel bien desarrollado.

Jurecka *et al.* (2016) evaluaron el uso del NDVI y un índice de vegetación mejorado de dos bandas (EVI2) a una escala más detallada al usar varios métodos de teledetección (GreenSeeker, Drone, Landsat 8 y Sentinel 2). Comparativamente, los datos de detección remota proporcionaron una estimación precisa y pueden usarse para pronosticar el rendimiento o complementar las formas tradicionales de estimación del rendimiento. Asimismo, encontraron que las correlaciones del NDVI y de rendimiento fueron más robustas para los datos del Sentinel 2 (entre 0.82 y 0.83) que para los datos de drones (entre 0.64 y 0.71). El NDVI mostró correlaciones (de 0.64 a 0.83) ligeramente mayores que EVI2 (de 0.47 a 0.71). La correlación entre NDVI del GreenSeeker y el rendimiento del muestreo de cosecha osciló entre 0.61 y 0.72 y fue mayor a los datos de rendimiento del dispositivo de cosecha.

## **2.8. Cobertura del dosel**

La caña de azúcar tarda hasta cuatro meses desde la emergencia en producir un dosel de hojas completo, es decir, lo suficientemente grande como para interceptar casi toda la radiación entrante

(Allison *et al.*, 2007). Una variable de diagnóstico clave que se puede utilizar para estimar el desarrollo del dosel, la intercepción de la luz y la división de evapotranspiración, es la cubierta de dosel verde fraccional (CDVF).

La CDVF ha surgido como una variable no destructiva y relativamente fácil de medir que se emplea en disciplinas como la ecología, la ciencia ambiental y la agronomía para cuantificar la cubierta vegetal activa a diferentes escalas en el espacio y el tiempo. Korhonen *et al.* (2006) utilizaron el CDVF para medir la cubierta forestal del pino silvestre (*Pinus sylvestris* L.) y el abeto de Noruega (*Picea abies* L.).

También, el uso del índice CDVF se ha utilizado para medir la tasa de crecimiento de las malezas después de los eventos de labranza (Rasmussen *et al.*, 2010). Sharma y Ritchie (2015) usaron CDVF junto con la altura del cultivo y el NDVI para monitorear el crecimiento del algodón (*Gossypium hirsutum* L.) bajo diferentes regímenes de riego en estudios de fenotipado de alto rendimiento en Texas. Asimismo, se han desarrollado correlaciones estadísticas entre CDVF, IAF, NDVI y biomasa aérea (Nielsen *et al.*, 2012). El CDVF es una variable clave en modelos de atmósfera de suelo-planta como AquaCrop, en el que se usa para estimar el uso del agua en los cultivos (Raes *et al.*, 2009).

En las últimas décadas, las mejoras en la calidad de las imágenes producidas por cámaras digitales y dispositivos móviles, impulsaron el uso de imágenes digitales para mediciones de CDVF. Al mismo tiempo, numerosos métodos de procesamiento de imágenes y paquetes de software se han desarrollado para analizar imágenes digitales de plantas para una variedad de aplicaciones (Thorp y Dierig, 2011).

Actualmente, los paquetes de software disponibles para medir el dosel verde se pueden clasificar en dos grupos de acuerdo con su principio de clasificación de píxeles: clasificación

manual de píxeles (CMP) y clasificación automática de umbral de color (CAUC). Los CMP son particularmente útiles al calibrar los métodos CAUC o al calcular la proporción de varias especies de plantas u otros componentes como residuos de plantas, suelo o rocas que no se distinguen fácilmente mediante la configuración del umbral de color (Booth *et al.*, 2006).

SamplePoint, programa desarrollado por Booth *et al.* (2006), es un producto CMP ampliamente utilizado que ha incluido el monitoreo de la cobertura del suelo en la investigación de sistemas de cultivo, el monitoreo de la fenología de las plantas, el estudio de la intensidad de pastoreo y la variabilidad espacial en los pastizales (Augustine *et al.*, 2012), y desarrollando relaciones cuantitativas entre CDVF e IAF en cultivos, para que los datos de IAF puedan usarse en el modelo de simulación AquaCrop (Nielsen *et al.*, 2012).

Por otro lado, un paquete de software CAUC también ampliamente utilizado en agronomía es SigmaScan Pro 5, un producto del software Systat. Este software requiere un tono especificado por el usuario (rango de 0 a 360) y valores de saturación (rango de 0 a 100) (Purcell, 2000). Este software se ha utilizado para analizar la cobertura del dosel y la intercepción de la luz en la soya, el porcentaje de cobertura y el color del césped. Aunque este software puede ser significativamente más rápido que SamplePoint, las imágenes de alta resolución pueden generar tiempos de procesamiento >30 s por imagen (Karcher y Richardson, 2005).

Patrignani y Ochsner (2015), dieron a conocer la aplicación “canopeo”, la cual es una herramienta de medición de cubierta de dosel verde rápida y precisa. Se basa en una investigación realizada en la Universidad Estatal de Oklahoma (OSU, por sus siglas en inglés) y permite determinar con precisión el porcentaje de cobertura del dosel en tiempo real, permitiendo con ello monitorear con precisión el progreso de los cultivos y tomar decisiones informadas de manejo.

La aplicación se utiliza para cuantificar el porcentaje de cobertura del dosel de la vegetación verde viva para cualquier cultivo agrícola, césped o pradera en base a fotos hacia abajo tomadas con su dispositivo móvil, y es capaz de detectar la CDVF a alta velocidad en relación con los paquetes de software disponibles (SamplePoint y SigmaScan Pro 5), sin sacrificar la precisión. La función de video presente en esta herramienta es una novedosa adición a los paquetes de software que se utilizan para medir CDVF, lo que permite al usuario grabar una gran cantidad de imágenes y, por lo tanto, minimizar el error de muestreo (Patrignani y Ochsner, 2015).

Canopeo es una herramienta de análisis de imágenes ACT desarrollada en el lenguaje de programación Matlab (Mathworks, Inc., Natick, MA) que utiliza valores de color en el sistema rojo - verde - azul (RVA). Canopeo analiza y clasifica todos los píxeles de la imagen. El análisis se basa en la selección de píxeles de acuerdo con las proporciones de R/V, A/V y el índice de exceso verde (Liang *et al.*, 2012). El resultado del análisis es una imagen binaria donde los píxeles blancos corresponden a los píxeles que cumplieron con los criterios de selección (dosel verde) y los píxeles negros corresponden a los píxeles que no cumplieron con los criterios de selección (no dosel verde). La cobertura verde fraccional varía de 0 (sin cubierta verde) a 1 (cubierta 100% verde). La clasificación del dosel verde se basa en los siguientes criterios:  $R/V < P1$  and  $A/V < P2$  y  $2V-R-A > P3$

Donde P1 y P2 son parámetros que generalmente tienen un valor cercano a 1 (Parelo *et al.*, 2000) para clasificar los píxeles que están predominantemente en la banda V (~ 500–570 nm), y P3 es un parámetro que establece el índice mínimo del exceso de V, que generalmente tiene un valor de alrededor de 20 para seleccionar vegetación verde (Meyer y Neto, 2008). Los valores de parámetros predeterminados para Canopeo son  $P1 = 0.95$ ,  $P2 = 0.95$  y  $P3 = 20$ .

Una limitación de Canopeo y otros métodos de CDVF basados en imágenes digitales es la necesidad de mantener la cámara a una altura adecuada por encima del dosel. Sin embargo, para vegetaciones más altas (aproximadamente 2.5 m), se puede requerir el uso de imágenes aéreas o equipo especial. Es posible utilizar las relaciones R/V y A/V junto con el índice verde en exceso para detectar otros componentes de las imágenes digitales, pero esta posibilidad requiere más investigación. Además, se resalta la importancia de los programas MPC como SamplePoint, que son invaluable para la calibración y cuando existe la necesidad de estimar simultáneamente variables más complejas que no sean FGCC (Patrignani y Ochsner, 2015).

## **2.9. Análisis biométricos y producción de biomasa**

Para el análisis de los patrones de crecimiento de la caña de azúcar se deben realizar mediciones de variables biométricas, de biomasa y de rendimiento de la caña de azúcar (Marafon, 2012).

### **2.9.1. Datos biométricos**

Estos datos se miden en plantas intactas (evaluaciones no destructivas) o cosechadas (evaluaciones destructivas). Se pueden monitorear los siguientes parámetros: número de tallos industrializables por metro lineal (NTI  $m^{-1}$ ), diámetro medio de tallos (DMT), altura media de tallos (AMT), número de hojas verdes completamente abiertas (NHVA), de hojas emergentes (NHE) y de hojas muertas (NHM), la longitud (L) y la anchura (A) de la hoja +3 (tercera hoja superior completamente desarrollada, contada a partir de la hoja +1, la primera con la aurícula visible) (Silva *et al.*, 2012b).

Las hojas de la caña de azúcar se pueden ordenar a través del sistema de Kuijper que ayuda en los estudios de crecimiento y nutrición. La hoja de inserción más alta, que se encuentra completamente abierta y presenta la primera aurícula visible recibe la denominación de hoja +1, conocida como TVD (Top Visible Dewlap). Por debajo de ella, las hojas reciben sucesivamente los números +2, +3 y +4 (Marafon, 2012).

El NTI se obtiene contando los tallos a lo largo de la línea de cultivo, iniciada 2 meses después de la germinación. El DMT se mide en la base de los tallos, con el auxilio de un vernier, la AMT por medio de la utilización de una cinta métrica, midiendo desde la base del tallo hasta la inserción de la hoja +1 (primera hoja superior desarrollada y con la lígula visible). El NHV y el NHM se cuentan en cada uno de los tallos seleccionados, considerándose como hojas verdes, aquellas con al menos 50 % de área foliar verde. Para determinar el NHE se contabiliza considerando las hojas por encima de la hoja +1 que no se presentan completamente expandidas. Los datos de L y A se obtienen por medio de mediciones en la parte media y en los puntos extremos de las hojas +3, respectivamente, utilizando vernier y cinta métrica (Smit y Singels. 2006).

### **2.9.2. Producción de biomasa**

Los datos de biomasa seca de la caña de azúcar se obtienen después de la cosecha de las plantas, es decir, son evaluaciones destructivas. Los componentes estructurales de la parte aérea comprenden las hojas (verdes y secas y sus componentes estructurales) y el tallo. Las colectas se realizan, a nivel del suelo, de dos a cinco metros a lo largo de la fila de cultivo, dependiendo del tamaño de cada sub-área. El material es separado en sus componentes (tallos y hojas) y cuantificado por separado para obtener la biomasa fresca. Las muestras de cada uno de estos componentes se dirigen al laboratorio para la obtención de los contenidos de humedad y el cálculo de la biomasa seca de los diferentes componentes de la parte aérea (Simões *et al.*, 2005a).

La suma de los valores correspondientes a la biomasa de cada componente estructural de las plantas posibilita la determinación de la biomasa seca total de la parte aérea, utilizada en los cálculos de los parámetros de crecimiento (Marafon, 2012).

### 2.9.3. Productividad del cultivo (TCH)

Los componentes de la productividad de la caña de azúcar son: diámetro, altura, número y densidad de tallos. El parámetro que presenta mayor correlación con la producción es el número de tallos, seguido por la altura, el diámetro y la densidad. El número de tallos por superficie se estima mediante el recuento de los tallos totales de la parcela o de las tres líneas centrales, lo que puede realizarse a la hora de la cosecha (Marafon, 2012). También, este conteo se puede realizar a los 8 a 10 meses, pues el número de colmos ya estará definido y éstos todavía estarán erectos.

Obteniendo los datos anteriores y tomando en cuenta la densidad de tallos igual a uno (1) se puede aplicar la fórmula descrita por Oliveira *et al.* (2007), para determinar la productividad estimada del cultivo de caña de azúcar (TCH), de acuerdo con la ecuación siguiente:

$$TCH = D^2 \times NTI \times AMT \times \left( \frac{0.007854}{ESP} \right)$$

Dónde: TCH =corresponde a la productividad estimada en una superficie (t caña ha<sup>-1</sup>), D = diámetro de tallos (cm), NTI: tallos industrializables (No. tallos m<sup>-1</sup> lineal), AMT = altura media de tallos (cm), ESP = espaciamiento entre surcos (m) y 0.007854 es un factor de corrección apropiado para la caña de azúcar. Para determinar TCH se consideran los datos medios relativos a una o más evaluaciones, efectuadas a partir del octavo mes después del corte o siembra.

### 2.9.4. Determinación del índice de maduración (IM)

Según Marafon (2012), en condiciones normales, la caña de azúcar tiene su maduración influenciada por factores como humedad del suelo, temperatura, características físicas y químicas, manejo del cultivo y diferencias entre cultivares.

La calidad de la caña de azúcar se mide por el contenido de sacarosa, que depende de la fase de maduración, del estado sanitario y de las condiciones de conservación de los tallos. Durante la

maduración de la caña la sacarosa aumenta hasta alcanzar límites extremos del 12 al 18 %, mientras que los demás azúcares, glucosa y fructosa disminuyen hasta límites del 0.2% (Marafon, 2012).

El momento ideal para iniciar la cosecha de la caña de azúcar es cuando la planta se encuentra con la mayor concentración de azúcares. Este momento depende de diversos factores, tales como: región de cultivo, condiciones climáticas, edad del cultivo, cultivar, tipo de suelo, incidencia de plagas y enfermedades (Toppa *et al.*, 2010).

La determinación del índice de maduración (IM) de la caña puede realizarse mediante refractometría, realizándose los siguientes procedimientos (Marafon, 2012):

1. Al inicio de la cosecha, recorrer la parcela y cosechar al azar de 10 a 12 tallos;
2. Extraer algunas gotas de jugo de la base del tallo y medir el °Brix en refractómetro. A continuación, extraer unas gotas de jugo de la punta del tallo (último entrenudo, del cual la vaina se desprende fácilmente) y medir el °Brix en el refractómetro.
3. Calcular el IM, dividiendo los valores °Brix encontrados en la punta por los encontrados en la base, tomando la media de las muestras.

Los resultados deben interpretarse de la siguiente manera:

1. IM menor que 0.60: caña verde.
2. IM entre 0.60 y 0.85: caña en maduración.
3. IM entre 0.85 y 1.0: caña madura, lista para ser cortada.
4. IM mayor que 1.0: caña en declive de maduración.

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%, °Brix de 18 a 22%, pureza de 79 a 89%, fibra de 11 a 15%, humedad de 73 a 75% y azúcares reductores cercanos a cero (Salgado *et al.*, 2003).

Resultados obtenidos por Begue *et al.* (2010), en las islas Guadalupe y Reunión, demostraron que durante la fase de maduración (durante y después del período de NDVI máximo), existe una relación entre el NDVI derivado de las imágenes SPOT y los valores de °Brix medidos en el campo. Esta relación fue bastante lineal entre valores de °Brix de 12 a 25% y valores de NDVI de 0.4 a 0.7. Sin embargo, debajo de un valor NDVI de 0.4, las variaciones en el NDVI no correspondieron a las variaciones en los valores de °Brix que permanecen constantes en torno al 25%. Globalmente, el coeficiente de regresión fue alto con  $r^2 = 0.75$  y  $RMSE = 1.87\%$ .

### **2.9.5. 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 órgano 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 sacarosa de las zonas de la planta 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).

## **2.10. Sistema radicular del cultivo de caña de azúcar**

Diversos estudios citados por Faroni (2004), señalan que las primeras raíces que se desarrollan después de la siembra de caña de azúcar son las de fijación, originadas de los primordios radiculares situados en la zona radicular del esqueje sembrado. Durante aproximadamente 30 días de brotación de las yemas, la planta vive de las reservas de nutrimentos en el esqueje y parcialmente, del suministro de agua y nutrientes proporcionados por esas raíces de fijación. Después de ese periodo, inicia el desarrollo de las raíces de los tallos primarios, posteriormente de los secundarios y así sucesivamente. En la medida en que nuevas raíces se van desarrollando, las de fijación van perdiendo su función y la caña pasa a depender exclusivamente de las raíces de los tallos (Blackburn, 1984). Dependiendo de las condiciones climáticas y del suelo, en torno a 90 días después de la siembra, todo el sistema radicular se encuentra distribuido en los primeros 30 cm del suelo (Casagrande, 1991).

En el cultivo de la caña de azúcar, el esquema típico del sistema radicular fue descrito por Evans (1935), quien clasificó a las raíces de la caña de azúcar en tres tipos funcionales (Smith *et al.*, 2005):

**1. Raíces de sostén y/o fijación:** son las primeras en emerger de la base de los brotes jóvenes. Son relativamente gruesas con pequeñas ramificaciones y su crecimiento se produce en sentido vertical hacia las capas más profundas del suelo. Su función es dar anclaje a la planta.

**2. Raíces superficiales:** emergen de los nudos inmediatamente superiores a las raíces de sostén. Son raíces más delgadas y muy ramificadas que se extienden lateralmente, formando una densa

red de raíces superficiales responsables de la absorción de agua y nutrientes de la capa superficial del suelo.

**3. Raíces de cordón (profundas):** están formadas por aglomeraciones de raíces que crecen en sentido vertical. Alcanzan capas de suelo más profundas (hasta 6 m o más) y permiten acceder a reservas de agua en dichas capas. Sin embargo, es muy difícil encontrar este tipo de raíces en cultivares de caña de azúcar actuales.

El sistema de raíces juega un papel fundamental en la producción de los cultivos. Otorga soporte y anclaje a la planta en el suelo y es el encargado de absorber agua y nutrientes, necesarios para su crecimiento y desarrollo. La disponibilidad de agua y nutrimentos para el cultivo de caña de azúcar dependerá de las reservas en el medio, su dinámica en el suelo y la exploración que hagan de estas raíces, por ello, la capacidad del sistema radicular para cumplir con sus funciones fundamentales dependerá, de su grado de expansión, ramificación y penetración en el suelo. El crecimiento de las raíces está relacionado directamente con el suministro de fotoasimilados provenientes de la parte aérea, cualquier factor que la afecte, estará también actuando sobre el crecimiento y funcionamiento de la parte subterránea y viceversa. Al regular la tasa de absorción de agua y nutrimentos, el sistema radicular influirá en importantes procesos fisiológicos como la fotosíntesis, la respiración y la elongación celular, entre otros, e indudablemente en la producción de biomasa y en el rendimiento (Villegas, 2010).

Vasconcelos (2002), señala que el crecimiento del sistema radicular durante los ciclos de cultivo de caña de azúcar, es acumulativo para las socas sucesivas y que la muerte o la renovación de este sistema no es causada por la cosecha y sí por la deficiencia hídrica, independientemente de la fase de desarrollo. Después del corte de la caña de azúcar en el ciclo plantilla, el sistema radicular antiguo se mantiene en actividad por algún tiempo y durante ese periodo, es sustituido por las

raíces de los nuevos tallos del ciclo soca, siendo este proceso lento y gradual. Las raíces de soca son más superficiales que las de plantilla por el hecho de que los tallos de las socas brotan más cerca de la superficie del suelo que los del ciclo planilla. Por el mismo hecho, cuanto mayor el número de cortes, más superficial el sistema radicular de las socas (Faroni y Trivelin, 2006).

### **2.10.1. Distribución y profundidad**

La distribución y profundidad de exploración de las raíces tienen implicaciones netamente prácticas en los proyectos de riego, ya que señalan la profundidad de diseño y la cantidad de agua potencialmente aprovechable para el cultivo, siendo la distribución de las raíces la que proporciona los límites de la zona de extracción de agua. Similar importancia tendrá esta característica en el diseño de un sistema de drenaje al indicar el espesor de la capa de suelo a drenar, diseño de caudales, distancia entre goteros y entre laterales de riego, etc. (Romero *et al.*, 2015).

La determinación de la densidad aparente o de la resistencia a la penetración es una herramienta muy útil para estimar el efecto restrictivo que ocasiona una determinada condición edáfica sobre el crecimiento radicular. Aun así, las raíces serán el verdadero indicador (biológico) de la existencia o no de un problema de fertilidad en el perfil de suelo (Romero *et al.*, 2015).

Un sistema radicular profundo debe ser una característica deseable para los cultivares de caña de azúcar plantados en regiones que sufren estrés hídrico, debido a que ayuda a su capacidad para tolerar estas condiciones. Por lo tanto, la expresión del potencial de productividad agrícola de un genotipo de caña de azúcar en determinado ambiente de producción depende del complejo radical que se desarrolla en el suelo (Smith *et al.*, 2005).

Otto *et al.* (2014) concluyeron que la aplicación de fertilizante N en caña de azúcar aumenta temporalmente la densidad de la raíz en el lugar donde se aplicó el fertilizante, pero el efecto fue variable entre los sitios. Además, el efecto de la adición de N en la biomasa de la raíz, la biomasa

aérea y la acumulación de N fue limitado y no respalda la hipótesis de que las altas tasas de N aumentarán el crecimiento de la raíz de la caña de azúcar y el N almacenado en las raíces.

Las características genéticas de los cultivares de caña de azúcar determinan diferencias en cuanto al desarrollo y distribución del sistema radical. Existen cultivares con mayor concentración de raíces en la superficie, mientras otras presentan una distribución más uniforme. Algunos cultivares muestran mayor proporción de raíces finas y delicadas, mientras que en otros predominan raíces gruesas y resistentes (Rodríguez-Gross *et al.*, 2011).

La densidad de raíces finas, gruesas y total presenta un comportamiento diferencial de los genotipos por profundidad y localidades. Los porcentajes de densidad total de raíces por profundidad y localidad oscilaron de 42.6 a 55.5% para la profundidad de 0 a 20 cm y entre 5.6 y 11.7% de los 60 a 80 cm. Asimismo, cuantificaron correlaciones moderadas y significativas del rendimiento agrícola de los cultivares con las variables de densidad, la mayor correlación se corresponde con las raíces gruesas, seguido de la densidad total de raíces (Rodríguez-Gross *et al.*, 2011).

#### **2.10.2. Métodos de medición de raíces**

Para la evaluación del sistema radicular, el método de muestreo en monolitos es considerado el principal, ya que permite estimar mayor cantidad de raíces, lo que resulta en una mayor exactitud (Silva-Olaya *et al.*, 2017). Sin embargo, la principal limitación de esta técnica se basa en la inversión de tiempo y esfuerzo físico que este conlleva.

El método de la sonda se muestra como una alternativa viable para evaluar el sistema de raíces, ya que permite, con menos esfuerzo, cuantificar la masa de raíces en un volumen de suelo más pequeño. Otto *et al.* (2009), mencionaron que esta metodología es comparable a la metodología del monolito, sin diferencias significativas entre ambos métodos. Sin embargo, Vasconcelos *et al.*

(2003), señalan que el muestreo por sonda sobrestima la cantidad de raíces, lo que sugiere que se debe analizar un mayor número de muestras.

El método de dilución isotópica con  $^{15}\text{N}$  posibilita cuantificar la masa de raíces metabólicamente activas (vivas) de caña de azúcar y su distribución en el suelo, así como cuantificar la masa de raíces metabólicamente activas que no son cuantificadas en el proceso de tamizado o separación de las raíces del suelo (Faroni y Trivelin, 2006).

Vasconcelos *et al.* (2003), compararon los resultados de cinco métodos para cuantificar el sistema radical (monolítico con cuantificación de masa seca de raíces, monolítico midiendo la longitud promedio de raíces secas, método de barrena con cuantificación de masa seca de raíces, método de perfil con cuantificación de longitud por sistema de análisis de raíces y cobertura del suelo (SIARCS), y método de perfil contando el número de raíces), en dos cultivares de caña de azúcar (IAC87-3396 y RB85553), en cuatro profundidades (0-20, 20-40, 40-60 y 60-80 cm) y en dos sistemas de cosecha (caña cruda mecanizada y caña quemada manual), concluyendo que, el método de barrena, con dos submuestras, sobrestimó la cantidad de raíces, siendo, los métodos de estudio de raíces en perfil, los más adecuados para detectar diferencias entre tratamientos, ya que tienen coeficientes de variación más bajos, aunque pueden subestimar la cantidad de raíces en la capa superior del suelo. Asimismo, los atributos físicos y químicos del suelo influyen en la relación entre la longitud y la masa de las raíces secas para diferentes cultivares, profundidades y sistemas de cosecha, lo que puede influir en la eficiencia y precisión de los métodos de estudio de raíces

Silva-Olaya *et al.* (2017) concluyeron que cuando se utiliza el método de sonda, la posición del punto de muestreo define el grado de precisión de los resultados obtenidos, siendo que en la mayoría de los casos el método de la sonda tiende a subestimar la densidad radicular en caña de

azúcar en la capa de 0-20 cm de profundidad y sobreestimar esta variable en la capa de 20 a 40 cm de suelo. La colecta de muestras con sonda siguiendo la combinación de muestreo en los puntos 3, 5 y 7 (Figura 2) mostró resultados similares a los encontrados con el método del monolito.

### **2.11. Modelación en caña de azúcar**

El crecimiento de la caña de azúcar ocurre a través de la interacción del cultivo con factores ambientales. La mejor comprensión de tales interacciones puede obtenerse mediante el análisis cuantitativo del crecimiento y mediante mediciones biométricas de las plantas durante su desarrollo, lo que permite el uso de índices fisiológicos en el intento de verificar las diferencias entre cultivares y modelar el crecimiento en diferentes prácticas de manejo y ambientes de producción. (Freire *et al.*, 2010).

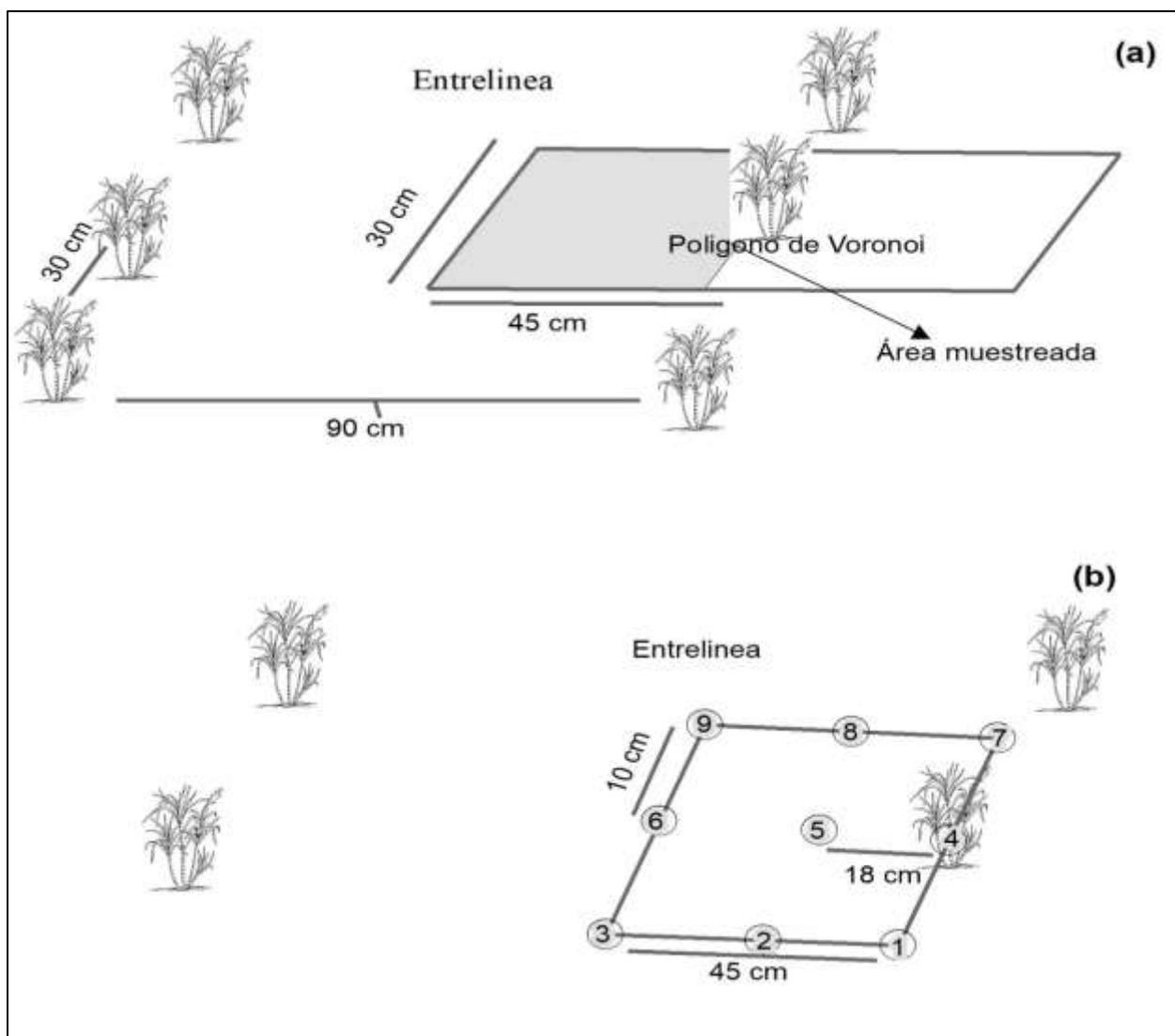


Figura 2. Esquema de muestreo de raíces en la mitad del polígono de Voronoi por el método del monolito (a) y por el método de la sonda (b), los números representan los puntos de muestreo con la sonda.

Los modelos de cultivo con parámetros bien calibrados, son herramientas útiles para mejorar la productividad de la caña de azúcar, ya que ayudan en la síntesis y aplicación del conocimiento y en el pronóstico del rendimiento (Bravo-Mosqueda *et al.*, 2014), siendo una herramienta de apoyo para la toma de decisiones sobre el manejo del cultivo (Sexton y Everingham, 2014).

De acuerdo a Machado *et al.* (1985), la elaboración de un modelo matemático-fisiológico ofrece una serie de ventajas:

1. Se puede reunir información de los diferentes procesos fisiológicos en un solo modelo, para tener idea del cultivo como un todo,
2. Un modelo resume convenientemente gran cantidad de información,
3. La base matemática para las hipótesis adoptadas permite comprender cuantitativamente la naturaleza de las interacciones ambiente-planta,
4. El modelado estimula nuevas ideas,
5. La elaboración de un modelo ayuda a detectar áreas donde el conocimiento es limitado, y
6. Los modelos permiten interpolaciones y predicciones.

Un modelo de crecimiento consiste en una serie de ecuaciones que describen cuantitativamente el comportamiento fisiológico del cultivo en respuesta a la variación temporal de las condiciones ambientales. El modelo de crecimiento debe ser lo más simple posible y describe una condición media del cultivo y no de plantas individuales, y considera que:

1. Las plantas están en la etapa vegetativa, o sea, el proceso de germinación no es incluido.
2. El cultivo no presenta deficiencia nutrimental.
3. El cultivo está libre de infestaciones de plagas y enfermedades (Machado *et al.*, 1985).

Existe una fuerte evidencia de que los modelos de simulación de cultivos juegan un papel importante en la investigación científica, ya que permiten analizar y conectar los factores que pueden aumentar la producción de cultivos y llevar a cabo la transferencia de tecnología a los sistemas de producción (Barbieri *et al.*, 2010).

La mayor parte de la literatura científica sobre modelaje agrícola, es originaria de países como Australia, Estados Unidos, Sudáfrica, Francia y Brasil. En un estudio sobre el estado del arte de la modelación en caña de azúcar en Latinoamérica, Marin *et al.* (2018), mencionan que existen varios modelos de crecimiento de la caña de azúcar, pero sólo dos (APSIM-Sugar y DSSAT /

CANEGRO) están disponibles para cualquier tipo de usuario; siendo estos los más utilizados en el mundo incluyendo América Latina y el Caribe. Aunque presentan una estructura muy diferente, ambos fueron desarrollados con base en el modelo CERES-Maize de la familia DSSAT. Sin embargo, actualmente se tiene presencia de otros modelos como WOFOST, CROPWAT, AquaCrop, SWAP, y SAMUCA.

El modelo QCANE desarrollado en Australia, sigue un enfoque mecanicista enfocado en la fotosíntesis, respiración y en la partición de los fotoasimilados. En este modelo, todos los fotoasimilados producidos diariamente son divididos en biomasa estructural y en sacarosa en las diferentes partes de la planta. Este modelo tiene por característica principal, la simulación del uso de la sacarosa por la planta, pudiendo ser utilizada como carbono estructural o en la respiración de mantenimiento. La fotosíntesis diaria total es determinada por la radiación fotosintéticamente activa y la temperatura, calibrada con los datos experimentales locales (Liu y Kingston, 1995).

Los mismos autores evaluaron el desempeño de los modelos QCANE, APSIM-Sugar y DSSAT / CANEGRO, demostrando que el primero presentó una incertidumbre relativamente menor en la simulación de la biomasa con relación a los demás. Antes del QCANE, el primer modelo de caña a nivel mundial fue el AUSCANE (Jones *et al.*, 1988), diseñado a partir del sistema EPIC (Erosion Productivity Impact Calculator) para apoyar en el estudio de problemas de erosión del suelo, productividad del cultivo y aspectos económicos. El AUSCANE, sin embargo, fue considerado débil en los aspectos biológicos de la caña de azúcar y compuesto por códigos desestructurados, justificando la iniciativa que dio origen al modelo APSIM-Sugar (O'Leary, 2000).

En 1995, el Centro de cooperación internacional en investigación agronómica para el desarrollo (CIRAD, Francia) desarrolló con base en datos experimentales de las islas La Reunión y Guadeloupe, un modelo de simulación de caña de azúcar denominado MOSICAS, el cual permite

a partir de datos de entrada, como: meteorológicos, de suelo, de la planta, de los cultivares, del cultivo y su manejo, calcular diariamente variables ambientales y de crecimiento del cultivo. Según Sugitani (2006) el modelo es denominado modelo explicativo, porque analiza el sistema como un todo, además de los procesos por separado, describiéndolos cuantitativamente. Este modelo fue evaluado por Bernardes *et al.* (2007), quienes encontraron una buena correlación entre los datos simulados y observados, resaltando la importancia de este modelo para la investigación del crecimiento y el rendimiento de la caña de azúcar en las condiciones del sudeste brasileño.

El modelo CANEGRO se desarrolló en Sudáfrica con el fin de modelar los procesos fisiológicos más relevantes de la industria azucarera sudafricana, siendo uno de los modelos más utilizados en todo el mundo. Incluido en el sistema DSSAT (versión 3.1), y actualizado en la versión 4.5 del DSSAT por Singels *et al.* (2008), el modelo DSSAT / CANEGRO se ha aplicado en diversas regiones del mundo para análisis y en el avance del conocimiento de los sistemas de producción de caña de azúcar (Marin *et al.*, 2015).

Singels *et al.* (2008) presentaron las principales características del DSSAT/CANEGRO, basándose en descripciones fisiológicas del crecimiento y desarrollo de la caña de azúcar incluyendo la fenología, desarrollo del dosel, amacollamiento, acumulación y partición de biomasa, crecimiento de raíces, estrés hídrico y el acame del cultivo.

Nassif *et al.* (2012), evaluaron el modelo DSSAT/CANEGRO para cinco cultivares brasileños de caña de azúcar y parámetros del cultivo, concluyendo que el modelo DSSAT/CANEGRO presenta mejor capacidad predictiva para las variables de productividad, contenido de sacarosa, altura del tallo e índice de área foliar, cuando se parametriza con la técnica Glue, con ajuste visual en conjunto, para evitar la pérdida de procesos fisiológicos por simulación. Por lo tanto, el modelo

es una herramienta prometedora para la simulación del crecimiento del cultivo de caña de azúcar para cultivares brasileños, cuando se parametriza adecuadamente.

Otra versión de CANEGRO fue producida por Stella *et al.* (2015) quienes reimplentaron el modelo de acuerdo con la arquitectura de BioMA. Esta versión fue utilizada por Pagani *et al.* (2017) en un prototipo de sistema de pronóstico de rendimiento de caña de azúcar, aplicado al Estado de São Paulo, Brasil.

El Simulador de Sistemas de Producción Agrícola (APSIM) fue desarrollado por la Unidad de Investigación en Sistemas de Producción Agrícola (APSRU), grupo colaborativo establecido bajo liderazgo de la Organización de Investigación Científica e Industrial de la Commonwealth (CSIRO) de Australia. Desde su creación, el APSIM fue proyectado como un simulador de sistemas agrícolas que tiene como característica combinar la estimación de rendimiento de los cultivos, de manera precisa e inherente al sistema de gestión, con la previsión de las posibles consecuencias a largo plazo de las prácticas agrícolas sobre los recursos del suelo (Keating *et al.*, 2003). El modelo APSIM-Sugarcane es un módulo del APSIM que tiene sus procesos funcionando de acuerdo con el estadio fenológico para simular el desarrollo vegetal de la caña de azúcar, simultáneamente con el desarrollo de otras especies vegetales, o en otros contextos diferentes de manejo, clima o tipo de suelo (Keating *et al.*, 1999).

En Colombia, Villegas *et al.* (2005), desarrollaron el modelo CASUPRO para aplicaciones en la industria colombiana y su implementación en el sistema de soporte a la decisión para la transferencia de agro tecnología (DSSAT), teniendo como premisa obtener un modelo dinámico, mecanístico (basado en procesos simplificados del suelo y de la planta), con estructura modular, simulación de procesos de balance de carbono - agua - nitrógeno, aplicables a diferentes condiciones e insertado en el DSSAT. El principal énfasis del modelo es la simulación de la masa

de tallos y el contenido de sacarosa. En la simulación de la productividad económica son considerados la radiación solar, la temperatura y el fotoperíodo como los factores que determinan la producción. El modelo CASUPRO incluye además características de los cultivares de caña de azúcar, como la estructura del tallo y hojas, la población de tallos, la capacidad de producción de biomasa y sacarosa, así como los estadios fenológicos.

Barbieri *et al.* (2010), desarrollaron BRCANE, un modelo de previsión del rendimiento potencial de la productividad, sin restricciones de la nutrición y el agua, para el cultivo de caña de azúcar para analizar la sostenibilidad de la nueva ampliación de zonas de cultivo, enfocados en la producción de etanol.

Aquacrop es un modelo genérico de crecimiento de cultivos desarrollado por la FAO para evaluar el efecto del medio ambiente y la gestión en la producción de cultivos. Cortés *et al.* (2013), calibraron y aplicaron el modelo AquaCrop para el análisis de las consecuencias del cambio climático en una región productora de caña de azúcar en el departamento del valle del Cauca, Colombia. Los resultados de la simulación mostraron un incremento en la productividad de la caña, si los escenarios climáticos futuros proyectados por el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC) se concretan.

Marin y Jones (2014), propusieron el modelo SAMUCA para simulación del crecimiento de la caña de azúcar con base en procesos biofísicos. Posteriormente, Marin *et al.* (2017) lanzaron la versión estocástica para este modelo.

Baez-Gonzalez *et al.* (2017), realizaron un trabajo para calibrar los parámetros de cultivo para el cultivar de caña de azúcar CP 72-2086 en condiciones de secano utilizando el modelo ALMANAC (Alternativas de manejo de tierras agrícolas con criterios de evaluación numéricos) y evaluar su idoneidad para simular la productividad de la caña de azúcar en una gama de

condiciones de secano en México (San Luis Potosí, Oaxaca y Jalisco). Concluyeron que fue posible calibrar 14 parámetros de cultivo con los cuales el modelo mostró la mayor precisión y capturó mejor la magnitud de las fluctuaciones de rendimiento: índice máximo de área foliar de 7.5, índice de disminución del índice de área foliar de 0.3, temperatura óptima y mínima para el crecimiento de plantas de 32 y 11°C, respectivamente, unidades de calor potencial de 6,000 a 7,400 grados día base 11°C, índice de cosecha 0.9, altura máxima del cultivo de 4.0 m, profundidad de la raíz de 2.0 m y coeficiente de extinción de luz ( $k$ ) de 0.69. También indicaron que el valor de  $k=0.65$  se considera un valor razonable para usar cuando se desconoce el valor de  $k$  para un cultivar de caña de azúcar.

### **3. OBJETIVOS**

#### **3.1. Objetivo general**

Evaluar la dinámica de crecimiento de tres cultivares de caña de azúcar en la zona de abastecimiento del Ingenio Santa Rosalía de la Chontalpa (ISRCH), Tabasco, durante los ciclos de cultivo plantilla y soca.

#### **3.2. Objetivos particulares**

1. Analizar las características biométricas de tres cultivares de caña de azúcar durante los ciclos de cultivo plantilla y soca.
2. Estimar el índice de área foliar, índice de vegetación de diferencia normalizada y porcentaje de cobertura de tres cultivares de caña de azúcar y su relación con el rendimiento, durante los ciclos de cultivo de plantilla y soca.
3. Determinar la materia seca de raíces de tres cultivares de caña de azúcar ciclo plantilla.

4. Medir el rendimiento de tallos, materia seca y las tasas de crecimiento relativo, absoluta, del cultivo y el índice de cosecha de tres cultivares de caña durante los ciclos de cultivo plantilla y soca.
5. Cuantificar la calidad de jugo de tres cultivares de caña de azúcar durante los ciclos de cultivo de plantilla y soca.
6. Simular el porcentaje de cobertura y rendimiento de biomasa de tallos de tres cultivares de caña de azúcar, a través del modelo AquaCrop, durante los ciclos de cultivo de plantilla y soca.

### **3.3. Hipótesis**

1. Los cultivares de caña de azúcar presentan diferencias en cuanto a sus características biométricas y en los ciclos de cultivo de plantilla y soca.
2. Los cultivares de caña de azúcar presentan diferencias en el índice de área foliar, índice de vegetación de diferencia normalizada y porcentaje de cobertura, y al menos uno de estos índices se relaciona con el rendimiento de los cultivares.
3. Los cultivares de caña de azúcar presentan diferencias en la acumulación de materia seca de raíces.
4. Los cultivares de caña de azúcar presentan diferencias en el rendimiento de tallos, materia seca y tasas de crecimiento en los ciclos de cultivo de plantilla y soca.
5. Los cultivares de caña de azúcar presentan diferencias en la calidad del jugo en los ciclos de cultivo de plantilla y soca.
6. El modelo Aquacrop es eficiente para simular el porcentaje de cobertura y el rendimiento de biomasa de tallos de los cultivares de caña de azúcar en los ciclos de cultivo de plantilla y soca.

## **4. MATERIALES Y MÉTODOS**

### **4.1. Sitio experimental**

El experimento se realizó en condiciones de temporal, durante los ciclos de cultivo de plantilla y soca, en el área de abastecimiento del Ingenio Santa Rosalía de la Chontalpa (ISRCH), Tabasco, utilizando tres cultivares de caña de azúcar (MEX 69-290, MEX 79-431 y CP 72-2086). Para ello se ubicaron y georreferenciaron nueve parcelas de ciclo plantilla, con fechas de siembra del 15 de diciembre de 2017.

En tres parcelas se describió un perfil de suelo de acuerdo a la metodología de Cuanalo (1991). Por cada horizonte del perfil se tomaron muestras que se secaron al aire y a la sombra, se molieron con mazo de madera y se pasaron a través de un tamiz de 2 mm. El análisis correspondiente se realizó de acuerdo con los métodos descritos en la NOM-021-RECNAT-2001. A partir de la descripción de perfiles *in situ* y del análisis físico y químico, se procedió a la clasificación de los suelos, tomando el Referencial Mundial de Suelos (Iuss Grupo de Trabajo wrb, 2007).

### **4.2. Manejo agronómico**

El manejo agronómico del cultivo de caña de azúcar estuvo a cargo de los productores cooperantes. La preparación del terreno consistió en un pase de barbecho profundo, tres pases de rastra cruzada y el surcado a 1.3 m de separación. La siembra se realizó de forma manual, a doble cordón utilizando el método de punta y cola, en el mes de diciembre de 2017 y se cosechó en abril de 2019 en el ciclo plantilla y en abril 2020 en el ciclo de soca.

Se realizó control químico de malezas aplicando 1.5 L de Spartacus® (Ametina + 2,4-D (Ester)) + 1.5 L de Huracán Flow® (Diurón + hexaxinona) por 200 L de agua (esta labor se realizó en los meses de enero y marzo del 2018 en el ciclo plantilla y en junio del 2019 en el ciclo soca). También

se realizó control manual de malezas en mayo 2018 en el ciclo plantilla y en agosto 2019 en el ciclo soca.

La fertilización se realizó utilizando 350 kg ha<sup>-1</sup> del fertilizante químico Yaramila Activa® 21-07-14 NPK, que equivale a 73.5, 24.5 y 49 kg ha<sup>-1</sup> de N, P y K, respectivamente. La aplicación se llevó a cabo en abril del 2018 en el ciclo plantilla y en julio del 2019 en el ciclo de soca.

### **4.3. Variables de estudio**

#### **4.3.1. Análisis nutrimental del cultivo de caña de azúcar**

**Contenido de nitrógeno (N) 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 laboratorio de análisis de suelos, plantas y aguas (LASPA) del Colegio de Postgraduados-*Campus* Tabasco. Esta variable se determinó durante el ciclo plantilla.

En el LASPA, la lámina foliar fue secada a 60°C por 24 h y se molió en malla de 2 mm en molino Wiley para la determinación de N total, por el método de micro Kjeldahl.

**Concentración de clorofila.** El muestreo foliar para determinar la clorofila se realizó a los 4 meses de edad del cultivo, con un horador circular de 1 cm<sup>2</sup> 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). Los tres discos restantes se utilizaron para determinar la masa seca a 60°C durante 72 h. En el laboratorio, las muestras continuaron la incubación a temperatura ambiente y en la oscuridad hasta completar 24 h. Las absorbancias se midieron a 480, 647 y 664 nm en un Espectrofotómetro UV-Visible, Thermo Scientific, Modelo Multiskan go.

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

Ct = Clorofila “a” + Clorofila “b” expresada en  $\mu\text{g cm}^{-2}$  (si utilizó 1  $\text{cm}^2$  de muestra) o  $\mu\text{g g}^{-1}$  (si consideró masa de órgano).

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

Dimetilformamida:

$$Ca = 12(A_{664}) - 3.11(A_{647})$$

$$Cb = 20.78(A_{647}) - 4.88(A_{664})$$

$$CX + C = (1000(A_{480}) - 1.12(Ca) - 34.07(Cb)) / 245$$

Para el análisis estadístico de los datos se utilizó un diseño completamente al azar con tres repeticiones. Se realizó el análisis de la varianza (ANAVA) para el efecto de cultivar (Cv), con un nivel de significancia  $p \leq 0.05$ . Observándose diferencias estadísticas, se realizó la comparación múltiple de medias de Tukey, utilizando para ello, el software estadístico INFOSTAT versión 2018.

#### **4.3.2. Variables biométricas del cultivo de caña de azúcar**

**Número de hijuelos.** El conteo de hijuelos (No.  $\text{m}^{-1}$  lineal) se realizó en 2 m lineales de los 60 a 120 días después de la siembra (DDS) durante el ciclo plantilla y de 30 a 90 días después de la

cosecha (DDC) en el ciclo soca, los cuales corresponde a los primeros tres meses de crecimiento del cultivo en ambos ciclos de cultivo.

Para el análisis estadístico de los datos de número de hijuelos se utilizó un diseño de bloques al azar, con un arreglo factorial 3 x 3 (3 Cv x 3 fechas de muestreo) con 15 repeticiones. Se realizó el análisis de la varianza (ANAVA) para el efecto Cv, fecha de muestreo y la interacción Cv x fecha de muestreo, con un nivel de significancia  $p \leq 0.05$ . Observándose diferencias estadísticas, se realizó la comparación múltiple de medias de Tukey, utilizando para ello, el software estadístico INFOSTAT versión 2018.

**Número de tallos.** El conteo de tallos (No.  $m^{-1}$  lineal) se realizó en un surco de 2 m lineales de cada sitio, a partir del cuarto mes de crecimiento y hasta la cosecha del cultivo, de acuerdo con Machado *et al.* (1985).

**Diámetro de tallos.** El registro del diámetro de tallos (mm) se realizó mensualmente hasta la cosecha, en 10 tallos de cada sitio, a partir del cuarto mes de crecimiento, utilizando un vernier en la parte media de cada tallo.

**Altura de tallos.** La medición de la altura de tallos (m) se realizó a partir del cuarto mes de crecimiento, en 10 tallos de cada sitio, utilizando un flexómetro desde la base del tallo hasta la última hoja con aurícula visible. Las mediciones se realizaron mensualmente hasta la cosecha.

Para el análisis estadístico de los datos de las variables número, altura y diámetro de tallos, se utilizó un diseño de bloques al azar, con un arreglo factorial 3 x 11 (3 Cv x 11 fechas de muestreo) en el ciclo de plantilla y 3 x 9 (3 Cv x 9 fechas de muestreo) en el ciclo de soca, con 15 repeticiones en cada ciclo. Se realizó el análisis de la varianza (ANAVA) para el efecto de Cv, fecha de muestreo y la interacción Cv x fecha de muestreo, con un nivel de significancia  $p \leq 0.05$ .

Observándose diferencias estadísticas, se realizó la comparación múltiple de medias de Tukey, utilizando para ello, el software estadístico INFOSTAT versión 2018.

#### **4.3.3. Índices de vegetación**

**Porcentaje de cobertura.** La estimación de la cobertura (%) se realizó tomando 10 lecturas en cada sitio en forma de zig-zag, para ello se utilizó un equipo celular con la aplicación “Canopeo” de la Universidad de Oklahoma. Para tomar las lecturas, el equipo celular se colocó a una altura de 60 cm sobre el dosel del cultivo.

Para el análisis estadístico de los datos de porcentaje de cobertura, se utilizó un diseño de bloques al azar con un arreglo factorial 3 x 6 (3 Cv x 6 fechas de muestreo) en el ciclo de plantilla y 3 x 5 (3 Cv x 5 fechas de muestreo) en el ciclo de soca, con 15 repeticiones en cada ciclo. Se realizó el análisis de la varianza (ANAVA) para el efecto Cv, fecha de muestreo y la interacción Cv x fecha de muestreo, con un nivel de significancia  $p \leq 0.05$ . Observándose diferencias estadísticas, se realizó la comparación múltiple de medias de Tukey, utilizando para ello, el software estadístico INFOSTAT versión 2018.

**Índice de Área Foliar (IAF).** La medición del índice de área foliar ( $m^2 m^{-2}$ ) se realizó mensualmente, tomando tres lecturas mensuales (Teruel *et al.*, 1997) en cada sitio, utilizando un equipo LAI 2200C, siguiendo el patrón ABBB.

**Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI).** La estimación de la vegetación diferencial normalizada (NDVI) se realizó durante el ciclo de desarrollo del cultivo (plantilla y soca), utilizando el sensor activo Trimble GreenSeeker 505 Hand-Heeld, con el cual se realizaron 10 lecturas por sitio en forma de zig-zag. Para tomar las lecturas, el sensor se colocó a una altura de 60 cm sobre el dosel del cultivo.

Para el análisis estadístico de los datos de IAF y NDVI se utilizó un diseño de bloques al azar con un arreglo factorial 3 x 12 (3 Cv x 12 fechas de muestreo) para el IAF y 3 x 15 (3 Cv x 15 fechas de muestreo) para el NDVI, con 15 repeticiones en cada ciclo de cultivo. Se realizó el análisis de la varianza (ANAVA) para el efecto de Cv, fecha de muestreo y la interacción Cv x fecha de muestreo, con un nivel de significancia  $p \leq 0.05$ . Observándose diferencias estadísticas, se realizó la comparación múltiple de medias de Tukey, utilizando para ello, el software estadístico INFOSTAT versión 2018.

#### 4.3.4. Productividad y tasas de crecimiento del cultivo

Se realizaron mediciones trimestrales a partir del tercer mes de edad del cultivo, hasta la cosecha del mismo, para determinar la materia seca de tallos, hojas y materia seca total ( $t \text{ ha}^{-1}$ ). En cada sitio se cosecharon al azar 2 m lineales, cada muestra fue separada en tallo y paja, los cuales se pesaron, picaron y se depositó una sub-muestra de 400-500 g en sobres de papel manila para ser secados en estufa a una temperatura de  $65^{\circ}\text{C}$  aproximadamente durante 72 h y, así obtener la materia seca.

La estimación de valores de tasa de crecimiento absoluto (TCA), tasa de crecimiento relativo (TCR), y tasa de crecimiento del cultivo (TCC), de acuerdo con Gava *et al.* (2001), también es conocida como tasa de producción de materia seca (TPMS), además del índice de cosecha (IC), se realizaron a partir de la materia seca utilizando las siguientes relaciones (Hunt *et al.*, 2002; Marafon, 2012):

$$TCA \text{ (kg dia}^{-1}\text{)} = (MS_2 - MS_1)/(t_2 - t_1)$$

Donde MS= masa seca aérea (biomasa total) de la planta en cualquier intervalo de tiempo.

t= tiempo.

$$TCR \text{ (g g}^{-1}\text{dia}^{-1}\text{)} = (\text{Ln}MS_2 - \text{Ln}MS_1)/(t_2 - t_1)$$

$$TCC (g m^{-2} dia^{-1}) = \left(\frac{MS^2 - MS^1}{S}\right) / (t_2 - t_1)$$

Donde S= unidad de área de muestreo (m<sup>2</sup>).

$$IC = \frac{MS \text{ tallos}}{MS \text{ total}}$$

**Productividad del cultivo (TCH) o Rendimiento.** Para determinar el rendimiento (t caña ha<sup>-1</sup>) se contaron los tallos molederos en 10 m lineales para obtener la cantidad de tallos m<sup>-1</sup> lineal y posteriormente este valor, se multiplicó por 7692 que es la cantidad de m lineales ha<sup>-1</sup> de caña, surcada a 1.3 m de distancia. Posteriormente, 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 de caña fresca (t caña ha<sup>-1</sup>) de acuerdo con la ecuación siguiente:

$$\text{Rendimiento (TCH)} = (\text{Masa media de tallos}) (\text{tallos ha}^{-1}).$$

Para el análisis estadístico de los datos de rendimiento y materia seca se utilizó un diseño de bloques al azar con un arreglo factorial 3 x 5 (3 Cv x 5 fechas de muestreo) en el ciclo de plantilla y 3 x 3 (3 Cv x 3 fechas de muestreo) en el ciclo de soca, con 15 repeticiones. Se realizó el análisis de la varianza (ANAVA) para el efecto de Cv, fecha de muestreo y la interacción Cv x fecha de muestreo, con un nivel de significancia  $p \leq 0.05$ . Observándose diferencias estadísticas, se realizó la comparación múltiple de medias de Tukey, utilizando para ello, el software estadístico INFOSTAT versión 2018.

#### 4.3.5. Calidad de jugo

La calidad de jugo se define por la humedad, la fibra, los °Brix, sacarosa, azúcares reductores y la pureza. En cada sitio se tomó una muestra por repetición, cada muestra constó de 10 tallos, las cuales fueron transportadas al laboratorio de campo del ISRCH para su respectivo análisis. Los

muestreos se realizaron en el periodo de 330 a 450 DDS en el ciclo plantilla y de 210 a 360 DDC durante el ciclo soca.

Para el análisis estadístico de los datos de calidad de jugo se utilizó un diseño de bloques al azar con un arreglo factorial 3 x 3 (3 Cv x 3 fechas de muestreo) en el ciclo de plantilla y 3 x 6 (3 Cv x 6 fechas de muestreo) en el ciclo de soca, con 9 repeticiones. Se realizó el análisis de la varianza (ANAVA) para el efecto de Cv, fecha de muestreo y la interacción Cv x fecha de muestreo, con un nivel de significancia  $p \leq 0.05$ . Observándose diferencias estadísticas, se realizó la comparación múltiple de medias de Tukey, utilizando para ello, el software estadístico INFOSTAT versión 2018.

#### **4.3.6. Distribución de raíces**

El muestreo de la distribución de raíces se llevó a cabo a través del método de monolitos, que consistió en realizar excavaciones de 1.5 m de largo (a partir del centro de la calle) x 1.0 m ancho x 0.9 m de profundidad para observar la distribución de las raíces en el perfil del suelo, posteriormente se extrajeron 4 monolitos de 37.5 cm de ancho, 30 cm de largo y 20 cm de espesor, a profundidades de 0-30, 30-60 y 60-90 cm, totalizando 12 monolitos con un volumen de 22.5 dm<sup>3</sup> (0.0225 m<sup>3</sup>) cada uno y un total de 90 dm<sup>3</sup> (0.09 m<sup>3</sup>) por capa de muestreo y 270 dm<sup>3</sup> equivalente a 0.27 m<sup>3</sup> de suelo por perfil. El suelo y raíces se colocaron en un tamiz para proceder a la separación manual, una vez obtenidas las raíces se procedió a lavarlas y se registró el peso fresco, después fueron colocadas en una estufa de ventilación forzada durante 72 horas a 70°C para determinar la masa seca, la cual fue referida al volumen muestreado (Otto *et al.*, 2009). Esta evaluación se efectuó a los 12 meses de crecimiento del cultivo (Machado *et al.*, 1985) en el ciclo plantilla.

Antes de realizar la extracción de los monolitos, en cada uno de ellos se midió la resistencia a la penetración, utilizando un penetrómetro de bolsillo, realizando tres lecturas por monolito.

Para el análisis estadístico de los datos se utilizó un diseño de bloques al azar, con un arreglo factorial  $3 \times 3 \times 4$  (3 cultivares  $\times$  3 profundidades  $\times$  4 distancias de muestreo), con tres repeticiones. Para las variables se realizó el ANAVA para el efecto de Cv, profundidad o distribución vertical (DV), distribución horizontal (DH) y las interacciones, con un nivel de significancia  $p \leq 0.05$ . Observándose diferencias estadísticas, se realizó la comparación múltiple de medias de Tukey, utilizando para ello, el software estadístico INFOSTAT versión 2018.

#### **4.3.7. Simulación del rendimiento de los cultivares de caña de azúcar**

Para realizar la simulación de la producción de biomasa de tallos en caña de azúcar, a través del modelo AquaCrop 6.1, se utilizaron datos diarios de tres estaciones climáticas WachDog 2900ET@: radiación solar ( $w/m^2$ ), humedad relativa (%), precipitación pluvial (mm), velocidad del viento (m/s) y temperatura máxima y mínima ( $^{\circ}C$ ). También se utilizaron datos de humedad de suelo a capacidad de campo y punto de marchitez permanente, densidad de suelo, además de los parámetros de cultivo descritos en el Cuadro 2.

La práctica más común para la parametrización consiste en ejecutar simulaciones con el modelo, iniciando con valores estimados de la literatura o de cultivos con principal similitud. Posteriormente, se compararon los resultados simulados por el modelo con los datos obtenidos experimentalmente, en seguida, se ajustaron los parámetros o se ejecuta la simulación y se compara, y así sucesivamente hasta que los índices estadísticos presenten los mejores resultados. El proceso de parametrización del modelo fue desarrollado por medio del método de prueba y error, siendo realizada para las tres parcelas de cada uno de los tres cultivares evaluados (Cuadro 2).

Cuadro 2. Parámetros de cultivo y valores usados para simular el porcentaje de cobertura del dosel (CC) y la biomasa de tallos a través del modelo AquaCrop en nueve parcelas comerciales del ISRCH.

Parámetro / Parcela	CICLO PLANTILLA								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
CC inicial	2.5	3.5	3	3.3	1.5	5.0	9	5.6	1.5
CC máximo	94	85	95	91	90	100	100	94	95
Días a emergencia	40	40	40	40	40	30	30	40	40
Días a maximo CC	210	210	210	154	210	180	160	210	210
Días a senescencia	420	423	378	280	353	420	398	423	430
Días a madurez	480	480	420	300	400	450	450	450	450
Días a floración	420	423	378	273	353	420	398	423	430
Periodo de formación del índice de cosecha	15	51	27	17	30	27	52	24	10
Duración de la floración	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Días a máxima profundidad de raíces	360	360	360	360	360	360	360	360	360
Parámetro / Parcela	CICLO SOCA								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
CC inicial	2.5	5	4	5	5	5	5	3.5	5
CC máximo	95	100	95	100	98	100	100	100	100
Días a emergencia	7	7	7	7	7	7	7	7	7
Días a maximo CC	160	150	150	150	150	165	165	175	150
Días a senescencia	290	290	305	290	295	295	290	315	290
Días a madurez	360	360	360	360	330	330	330	340	360
Días a floración	290	290	305	290	295	295	290	315	290
Periodo de formación del índice de cosecha	54	54	39	53	19	19	24	12	54
Duración de la floración	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Días a máxima profundidad de raíces	250	250	250	250	250	250	250	250	250

El manual de referencia de AquaCrop estima el porcentaje de cobertura del dosel (CC, por sus siglas en inglés) inicial a partir del número de plantas por hectárea al 90% de emergencia, mientras que la máxima cobertura del dosel que el cultivo de caña de azúcar alcanza es hasta un 95% (Raes *et al.* 2012). Por otro lado, Cortés *et al.* (2013) encontraron que este parámetro es de 94% y se alcanza entre los 180 y 190 días después de siembra y propone un CC inicial de 2.5.

La senescencia en caña de azúcar comienza a partir de los 330 días después de la siembra y la madurez del cultivo se alcanza a partir de los 365 días después de la siembra (Raes *et al.*, 2012; Salgado *et al.*, 2013). Cortés *et al.* (2013) propusieron que la senescencia inicia 50 días antes de la cosecha.

El análisis del desempeño del modelo en la simulación del rendimiento de biomasa de tallos, fue realizada comparando los valores observados de biomasa seca y del porcentaje de cobertura del suelo en campo, con aquellos simulados por el modelo. Los índices estadísticos utilizados fueron el error cuadrático medio (RMSE, por sus siglas en inglés), el coeficiente de determinación ( $r^2$ ), el índice de concordancia de Willmott (d) de acuerdo a Willmott (1982) y el índice de eficiencia (E) según Nash y Sutcliffe (1970).

El  $r^2$  describe la proporción de varianza total de los datos observados que pueden ser explicada por el modelo. Los valores de  $r^2$  varían de cero a uno, siendo que cuanto más próximo de uno, mejor el ajuste. El índice de concordancia (d) tiene un intervalo variando entre 0 y 1, siendo que, los valores próximos a 1, muestran una concordancia perfecta. El índice de eficiencia (E), puede variar de  $-\infty$  a 1. Una eficiencia de 1 corresponde a una relación perfecta entre los valores observados y los simulados por el modelo. Una eficiencia de 0 indica que las predicciones del modelo son tan precisas como la media de los datos observados, mientras que una eficacia menor que cero se genera cuando la media observada es mejor predictor que el modelo utilizado. De forma cualitativa, Molnar (2011) presentó la bondad de ajuste según los siguientes intervalos en función al valor de E (Cuadro 3). La RMSE es una medida de errores usados para representar las diferencias medias entre los valores predichos por el modelo y los valores observados.

Cuadro 3. Valores de referencia del índice de eficiencia de Nash y Sutcliffe (E).

E	Bondad de ajuste
<0.2	Insuficiente
0.2-0.4	Satisfactorio

0.4-0.6	Bueno
0.6-0.8	Muy bueno
>0.8	Excelente

Fuente: Molnar (2011).

## 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 5.1. Comportamiento del clima y características del suelo

La Figura 3 describe el comportamiento mensual de las variables climáticas: acumulación de precipitación pluvial (PP), promedio de temperatura mínima (Tmin) y máxima (Tmax) de las estaciones climáticas ubicadas en la Ranchería el Huiral y el Ejido Zapotal, dentro del área de estudio, durante las zafras 2018-2019 y 2019-2020. Se puede apreciar como en las dos localidades la dinámica de la PP se comportó de manera similar en cuanto a la distribución y volumen, las cuales ascendieron a 1,467 y 1,639 mm durante la zafra 2018-2019 y 1,705 y 1,997 mm durante la zafra 2019-2020, para la Ranchería El Huiral y el Ejido Zapotal, respectivamente. La Tmax osciló entre 26.9 y 39.2°C y la Tmin entre 16.9 y 24.0°C en el ciclo plantilla, mientras que, para el ciclo soca, la Tmax varió entre 28.0 y 37.5°C y Tmin entre 17.6 y 24.1°C. También se presenta la acumulación mensual de la evapotranspiración (Eto) calculada por el modelo AquaCrop, la cual varió de 58.4 a 145.2 mm en el ciclo plantilla y de 60.8 a 136.1 mm en el ciclo soca.

En las figuras 4, 5 y 6 se muestran los resultados del análisis de las propiedades físicas y químicas de tres perfiles de suelo en el área de estudio. En el caso del pH, se observó un promedio de 5.3, el cual es considerado como ligeramente ácido (Salgado *et al.*, 2013). Sin embargo, este disminuyó conforme aumentó la profundidad del suelo. En la primera capa de suelo de los perfiles 1 y 2, se encontraron valores de pH de 5.52 y 5.81, respectivamente, considerados como moderadamente ácido y un pH de 6.78 para la primera el primer horizonte del perfil 3, considerado

como neutro de acuerdo a la NOM-021-RECNAT-2001. El suelo presenta ausencia de  $Al^{3+}$ , buena disponibilidad de B y disponibilidad intermedia de los demás micronutrientes.

La conductividad eléctrica (CE)  $< 1 \text{ dS m}^{-1}$ , indicó que el suelo se encuentra libre de sales (Lizcano *et al.*, 2017). La densidad aparente varió de 1.10 a 1.19  $\text{g cm}^3$  en la primera capa de suelo de los tres perfiles, la cual es característica de suelos con textura arcillosa e indica compactación (Lizcano *et al.*, 2017).

La materia orgánica del suelo en el primer horizonte del perfil 1 (Figura 4) y 3 (Figura 6) fue de 5.9 y 5.4%, respectivamente, considerado un contenido alto, mientras que el perfil 2 presentó un contenido de MO de 6.4 (muy alto) en el primer horizonte (Figura 5). De igual manera, el N total fue alto (0.25%) para los perfiles 1 y 3 y muy alto (0.32%) para el perfil 2 en la primera capa de suelo. El contenido de fósforo fue alto (19.44 a 22.63  $\text{mg kg}^{-1}$ ), el contenido de potasio (K) fue medio (0.47-0.53  $\text{cmol (+) kg}^{-1}$ ), el calcio en el suelo fue bajo (2.55 a 2.77  $\text{cmol (+) kg}^{-1}$ ), el contenido de Mg en el suelo fue alto (3.84 a 4.70  $\text{cmol (+) kg}^{-1}$ ) y la capacidad de intercambio catiónico fue media (16.42 a 23.92  $\text{cmol (+) kg}^{-1}$ ) en el primer horizonte (NOM-021-RECNAT-2001). Estos resultados indican que el suelo no presentó restricciones de fertilidad química para el desarrollo de los cultivares de caña de azúcar en el área de estudio.

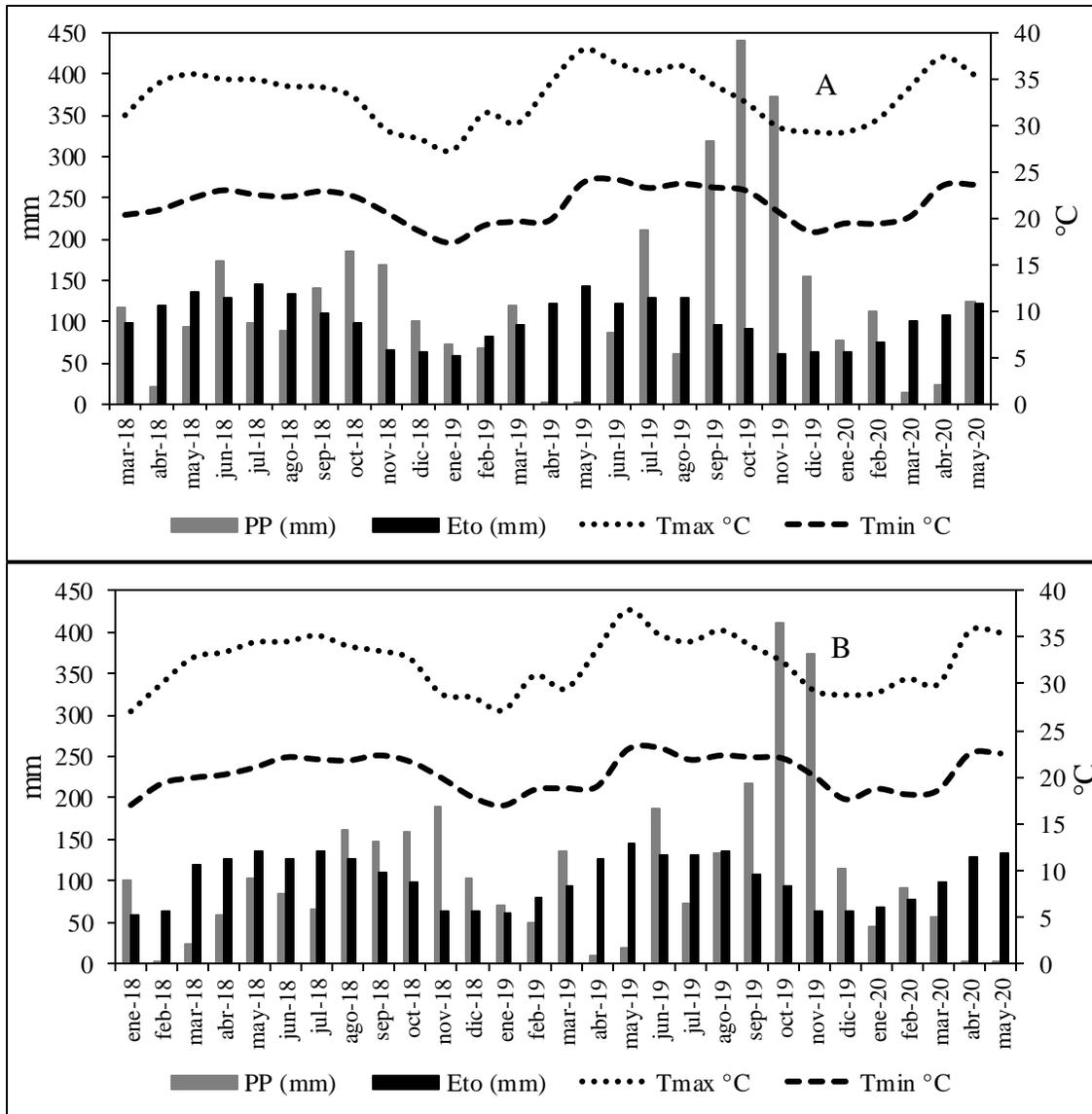


Figura 3. Datos climáticos mensuales obtenidos de dos estaciones climáticas automatizadas, instaladas en el área de abastecimiento del Ingenio santa Rosalía de la Chontalpa, durante las zafras 2018/2019 y 2019/2020. A) Ejido Zapotal, Cárdenas y B) R/a. El Huiral, Huimanguillo, Tabasco.

Perfil: COMPASS 1

Fecha: 16/03/2018

Localización: X:457541 Y:2008565

Localidad: Arena 6ta sección

Elevación: 4 msnm

Relieve: plano /

Drenaje superficial: sitio más o menos receptor que donador; drenes parcelarios a la orilla de la parcela 60 cm de profundidad

Drenaje del perfil: pobremente drenado

Material parental: aluvión del Cuaternario Reciente estable

Flora cultivada: caña de azúcar ciclo plantilla, alrededor maíz

Flora nativa: Popal

Fauna: Sin fauna

Observaciones: los horizontes 1 y 2 presentan agrietamiento con apertura no mayor a 1cm

Eutric Fluvic Stagnic Gleysol (Aric, Clayic, Drainic, Humic, Protovertic)



Perfil 1	Horizontes (cm)	Descripción del perfil
	0-24	Transición marcada e irregular; ligeramente húmedo; color 10YR 3/1 gris muy oscuro; motas marcadas, comunes y finas 10YR 5/4 pardo amarillento; consistencia en húmedo firme, en muy húmedo es pegajoso y plástico; textura arcillosa; poros numeroso muy finos y finos, continuos, caóticos dentro y fuera de los agregados y tubulares; estructura fuertemente desarrolladas e bloques subangulares y angulares finos, medios y grandes; raíces pocas, finas y delgadas; cutanes por planchado , por presión, caóticos espesos en caras de agregados de minerales arcillosos son óxidos e hidróxidos de hierro; permeabilidad moderada; fauna galenas de camarón; PH 6.
	24-69	Transición media y horizontal; húmedo; color 10YR 4/6 pardo amarillento oscuro – 10YR 3/6 pardo amarillento oscuro; motas marcadas, comunes, finas muy finas y medias 10YR 4/1 gris oscuro; consistencia en húmedo firme, en muy húmedo pegajoso y plástico; textura arcillosa limosa; poros numerosas, muy finos y finos continuos, caóticos dentro y fuera de los agregados y tubulares; estructura fuertemente desarrolladas en bloques angulares y subangulares, finas medias y grandes; raíces pocas, finas y delgadas; cutanes por planchado por presión caóticos espesos en caras de agregados de minerales arcillosas con óxidos e hidróxido de hierro; permeabilidad lenta; fauna galenas de camarón; PH 6.

	69 – 100	Transición media y horizontales; húmedo; color 10YR 4/1 gris oscuro; motas marcadas, comunes y finas 10YR 5/6 pardo amarillento; consistencia en húmedo firme y en muy húmedo pegajoso y plástico; textura arcillosa; poros frecuentes, muy finos y finos, continuos, caóticos dentro y fuera de los agregados y tubulares; estructura fuertemente desarrolladas en bloques subangulares en bloques subangulares y columnas finas y medias; raíces pocas y finas; sin cutanes; permeabilidad muy lenta; sin fauna; PH 5
	100 – 150	Sin transición; húmedo; color 10YR 4/1 gris; motas marcadas, comunes, muy finas y finas – 10YR 4/6 pardo amarillento oscuro; consistencia en húmedo firme en muy húmedo muy pegajoso y pastoso; textura arcillosa; poros frecuentes muy finos y finos, continuos, caóticos dentro y fuera de los agregados y tubulares; estructura fuertemente desarrollado en bloques subangulares y columnas finas y medios; raíces muy raras y finas; sin cutanes; permeabilidad muy lenta; sin fauna; PH 4

Horizontes	Profundidad (cm)	pH (H <sub>2</sub> O) rel. 1:2	CE dS m <sup>-1</sup>	MO	N	P mg kg <sup>-1</sup>	K	Ca	Mg	Na	CIC	Ac	Da g/cm <sup>3</sup>	Arcilla	Limo	Arena	Textura
				(%)			cmol (+) kg <sup>-1</sup>							(%)			
<b>H1</b>	0-24	5.52	0.08	5.9	0.25	19.44	0.47	2.55	3.84	0.38	16.42	0.20	1.17	28	60	12	FAL
<b>H2</b>	24-69	5.34	0.08	4.2	0.18	15.39	0.42	2.53	3.33	0.32	20.31	0.19	1.01	54	22	24	A
<b>H3</b>	69-100	5.27	0.07	3.8	0.11	11.56	0.39	2.52	3.05	0.28	18.37	0.19	1.05	46	36	18	A
<b>H4</b>	100-150	4.96	0.05	2.0	0.07	7.64	0.31	2.48	1.80	0.21	22.26	0.14	0.95	68	23	9	A

Figura 4. Descripción de perfil representativo de un suelo fluvisol éútrico en el área de abastecimiento del Ingenio Santa Rosalía de la Chontalpa. CE= conductividad eléctrica, MO= materia orgánica, CIC= capacidad de intercambio catiónico, Ac= Acidez intercambiable, Da= densidad aparente, FAL= franco arcilloso limoso, A= arcilla.

Perfil: COMPASS 6  
 Fecha: 16/03/18  
 Localización: 457178-1979256  
 Localidad: Ranchería El Huiral, Huimanguillo, Tabasco  
 Elevación: 22 msnm  
 Relieve: Planicie con pendiente inferior al 1%  
 Drenaje superficial: Normal  
 Drenaje del perfil:  
 Material parental: Aluvión reciente  
 Flora cultivada: caña de azúcar  
 Flora nativa: Malezas  
 Fauna: Aves  
 Observaciones: Día soleado, Hay material del 1° horizonte en el segundo

Eutric Pantofluvic Fluvisol  
 (Aric, Humic, Loamic)



Perfil 2	Horizontes (cm)	Descripción del perfil
	0-27	Transición tenue-horizontal; ligeramente húmedo; color 10 YR 3/2 pardo oscuro; textura arcilla media; estructura fuertemente desarrollada de forma bloques subangulares y grumosos; consistencia en húmedo firme y en muy húmedo plástico y pegajoso; cutanes por eluviación, espesos en caras de agregados de minerales arcillosos con hidróxido de hierro; poros, muy finos, finos y finos continuos, caóticos, dentro y fuera de agregados de forma tubular; permeabilidad rápida; raíces abundantes, finas, y delgadas; pH 6.0.
	27-55	Transición tenue horizontal; húmedo; color 10 YR 3/3 pardo oscuro; textura arcilla-limosa; estructura fuertemente desarrolladas de forma de bloques subangulares finos y medios muy finos; consistencia en húmedo firme y en muy húmedo pegajosa y plástico; cutanes por eluviación. Espeso en cara de agregados de minerales arcillosos con hidróxido de hierro; poros muy finos, finos y finos y medios; permeabilidad moderada; raíces pocas finas y delgadas; pH 6.
	55 – 81	Transición media horizontal; húmedo; color 10 YR 4/4 amarillento pardo oscuro; motas tenues, comunes muy fina 10YR 3/3 pardo oscuro; textura franco, arcilla limosa; estructura moderadamente desarrollado con forma de bloques subangulares finas y medios y finos; consistencia en húmedo friable en muy húmedo pegajosa y plástica; cutanes por eluviación; espesos en caras de agregados de minerales arcillosos con hidróxido de hierro; poros frecuentes muy finos y finos continuos, caóticos dentro y fuera de los agregados tubulares; permeabilidad moderada; raíces pocas, finas y delgadas; pH 6.

		81 – 141	Transición marcada horizontal; húmedo; color 10 YR 4/6 pardo amarillento oscuro; motas tenues, comunes y finas 10 YR 4/2 pardo grisáceo oscuro: textura migajón arenoso; estructura débilmente desarrollado con forma de bloques subangulares finos y medios; consistencia en húmedo muy friable en muy húmedo ligeramente pegajoso no plástico; cutanes por eluviación, espeso en cara de agregados de minerales arcilloso con hidróxido de hierro; poros frecuentes muy finos y finos continuos, caóticos dentro y fuera de los agregado tubulares; permeabilidad rápida; raíces raras, finas y delgadas: pH 6.														
		141-160	Transición marcada horizontal; húmedo; color 10 YR 5/6 amarillento pardo motas tenues comunes finas 10 YR 5/4 amarillento pardo; textura arenosa; sin estructura (grano suelto); consistencia suelta no pegajosa no plástica; cutanes por eluviación, esposos en caras de agregados de minerales arcillosas con hidróxido de hierro; poros frecuente finos y medianos continuos fuera de agregados tubulares; permeabilidad muy rápida; raíces muy raras y finas; pH 6.														
Horizontes	profundidad	pH (H <sub>2</sub> O) Rel: 1:2	CE dS m <sup>-1</sup>	MO	N	P mg kg <sup>-1</sup>	K	Ca	Mg	Na	CIC	Ac	Da g/ cm <sup>3</sup>	Arcilla	Limo	Arena	Textura
				-----(%)----	---		-----cmol (+) kg <sup>-1</sup> -----					------(%)-----					
<b>H1</b>	0-27	5.81	0.08	6.4	0.32	19.58	0.50	2.77	4.62	0.39	21.29	0.23	1.10	38	30	32	FA
<b>H2</b>	27-55	5.62	0.06	4.1	0.18	14.31	0.45	2.53	4.31	0.35	17.26	0.19	1.10	38	32	30	FA
<b>H3</b>	55-81	5.39	0.06	3.3	0.15	8.47	0.31	2.48	5.74	0.32	16.93	0.14	1.17	28	50	22	FA
<b>H4</b>	81-141	5.07	0.04	2.9	0.13	5.97	0.26	2.48	3.19	0.27	20.92	0.11	1.33	10	24	66	Far
<b>H5</b>	141-160	4.89	0.03	1.7	0.07	4.56	0.22	2.35	2.31	0.21	18.91	0.09	1.22	10	36	54	Far

Figura 5. Descripción de perfil representativo de un suelo fluvisol éútrico en el área de abastecimiento del Ingenio Santa Rosalía de la Chontalpa. CE= conductividad eléctrica, MO= materia orgánica, CIC= capacidad de intercambio catiónico, Ac= Acidez intercambiable, Da= densidad aparente, FA= franco arcilloso, Far =franco arenoso.

Perfil: COMPASS 7

Fecha: 16/03/18

Localización: X:466394 Y:1987348

Localidad: r/a Habanero Cárdenas, tabasco

Elevación: 17 msnm

Relieve: plano con ligera pendiente inferior al 1%

Drenaje superficial: normal, presencia de drenaje artificial a la cabeza de la parcela Drenaje del perfil: Imperfectamente drenado

Material parental: aluvión del Cuaternario Reciente

Flora cultivada: caña de azúcar ciclo: plantilla

Flora nativa: Malezas

Fauna: Sin fauna

Observaciones: Día soleado; en el 3° y 4° horizontes se observan capas de aluvionamientos sucesivos que poseen nódulos de manganeso indicando manto freático presente en alguna parte del año

Eutric Gleyic Pantofluvic Fluvisol (Aric, Drainic, Loamic)



Perfil 3	Horizontes (cm)	Descripción del perfil
	0-21	Transición tenue-horizontal; ligeramente húmedo; color 10 YR 3/2 pardo grisáceo muy oscuro, motas tenues, comunes, finas 10 YR 6/6 amarillo pardoso; textura franco; estructuro fuertemente desarrollado con forma de bloques subangulares muy finos, finos, y medios; consistencia en húmedo friable, en muy húmedo ligeramente pegajoso y ligeramente plástico; sin nódulos; poros numeroso, muy finos y finos, continuos, caóticos dentro y fuera de los agregados tubulares; permeabilidad rápida; fauna no hay; raíces comunes, finas y delgadas; PH 6.
	21-41	Transición marcada-horizontal; ligeramente húmedo; color 10 YR 5/6 pardo amarillento; motas tenue, comunes, muy finas y finas; 10 YR 4/6 negro amarillento pardo y 10 YR 3/1 muy negro grisáceo; textura migajón arenoso; estructura moderadamente desarrollado con forma de bloques subangulares muy finos y finos; consistencia en húmedo friable y en muy húmedo ligeramente pegajosa y no plástico; nódulos muy poco, pequeños, negro, angulares, blandos de carbón; poros numeroso muy fino y finos, continuos, caóticos dentro y fuera de los agregados; permeabilidad rápida; fauna no hay; raíces pocas y finas; PH 6.
	41 – 59	Transiciones media-ondulado; ligeramente húmedo; color 10 YR 4/6 pardo amarillento oscuro, moteado marcado , comunes, muy finos y finos 10 YR 3/1 gris muy oscuro y 10 YR 3/6 negro amarillento pardo; textura migajón limoso; estructura moderadamente desarrollado con forma de bloques subangulares y angulares muy finos; consistencia en húmedo friable y en muy húmedo; ligeramente pegajoso y plástico; nódulos pocos, muy pequeños, negros, esferoides y blandos de



## 5.2. Análisis nutrimental de cultivares de caña de azúcar

Los resultados del análisis de varianza (ANAVA), para la concentración foliar de nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K), de los cultivares, no mostraron diferencias estadísticamente significativas, lo cual coincide con lo reportado por Izquierdo-Hernández *et al.* (2016), para 10 cultivares de caña de azúcar con diferentes niveles de fertilización N en Tabasco, México. Respecto al contenido foliar de zinc (Zn), Azufre (S-SO<sub>4</sub>) y boro (B), en los cultivares, tampoco se encontraron diferencias estadísticamente significativas para estas variables, similarmente para el contenido de clorofila total (Cuadro 4), resultados similares a lo reportado por Espinosa *et al.* (2016) para 11 cultivares de caña de azúcar en Tabasco, aunque con valores ligeramente inferiores a los cuantificados en el presente trabajo.

Cuadro 4. Análisis nutrimental de tres cultivares (Cv) de caña de azúcar durante el ciclo de plantilla en el área de abastecimiento del Ingenio Santa Rosalía de la Chontalpa.

Cv	%			mg kg <sup>-1</sup>			Clorofila total (mg g <sup>-1</sup> )
	N	P	K	Zn	S-SO <sub>4</sub>	B	
MEX 69-290	2.51	0.31	1.14	6.47	0.23	2.29	0.479
CP 72-2086	2.61	0.33	1.19	6.13	0.26	2.00	0.588
MEX 79-431	2.50	0.35	1.18	4.47	0.21	2.24	0.556
C. V (%):	3.27	11.01	3.53	27.94	28.28	9.58	29.76
Probabilidad de F:							
Cv	0.2588NS	0.5034NS	0.2969NS	0.3299NS	0.5991NS	0.2617NS	0.1913NS
DMS	0.20777	0.09071	0.10329	4.09834	0.16534	0.52211	0.14504

NS= diferencia estadísticamente no significativa  $p \leq 0.05$ .

El contenido promedio de N foliar para los cultivares fue de 2.5% para MEX 69-290 y MEX 79-431 y 2.61% para CP 72-2086. Existen diferentes estándares para interpretar la concentración foliar de este nutrimento en hojas de caña de azúcar, de acuerdo con Jones *et al.* (1991), el contenido promedio de N de los cultivares se clasifica como medio (2.0-2.6%) y es ligeramente superior al reportado por Espinoza *et al.* (2016). El contenido de N demostró que los aportes de este nutrimento proveniente del suelo y del fertilizante N aplicado (73.5 kg N ha<sup>-1</sup>) fueron

suficientes durante el ciclo de cultivo de plantilla, aunque siempre se debe de considerar una aplicación adecuada de este nutrimento en el siguiente ciclo, toda vez que, en distintos estudios, se ha determinado que las dosis de N aumenta según el número de cortes, pero éstas aumentan significativamente más en suelos con contenidos bajos de materia orgánica (Cabrera y Zuaznábar, 2010; Pérez, 2012).

El contenido promedio de P foliar fue de 0.31 a 0.35%, valores que, de acuerdo con Jones *et al.* (1991), son considerados altos (>0.30%), lo cual significó que el contenido de este nutrimento en el suelo, junto con la fertilización realizada por los productores (24.5 kg P ha<sup>-1</sup>), suplieron la demanda de P, por los cultivares de caña de azúcar en el área de estudio durante el ciclo de plantilla.

El contenido promedio de K foliar de los cultivares evaluados fue de 1.14 a 1.19%, considerado como bajo, lo cual debe llevar a revisar la dosis de fertilizante potásica aportada (49.0 kg K ha<sup>-1</sup>). El contenido de S fue de 0.21 a 0.26%, el cual se considera como medio (>14%) El contenido de Zn fue de 4.47-6.47 ppm, Jones *et al.* (1991), establecieron como valor bajo de este micronutrimento de 15-19 ppm. Las concentraciones de B (2.0 a 2.29 ppm), fueron consideradas como bajas (2-3 ppm) de acuerdo con Jones *et al.* (1991). Los valores de dichos nutrimentos, son ligeramente superiores a los reportados por Espinoza *et al.* (2016) para 11 cultivares de caña de azúcar en Tenosique, Tabasco.

El contenido promedio de clorofila total para los cultivares de caña de azúcar evaluadas en este trabajo, varió entre 0.479 y 0.588 (Cuadro 4), dichos valores son ligeramente inferiores a la media reportada de 0.649 mg g<sup>-1</sup> para 15 cultivares Coimbatore, en la India (Radhamani *et al.*, 2016).

### 5.3. Análisis biométrico

#### 5.3.1. Número de hijuelos por metro lineal (No. m<sup>-1</sup> L)

Durante el ciclo plantilla, se observó diferencia estadísticamente significativa entre los cultivares MEX 79-431 y MEX 69-290, los cuales presentaron el mayor (12.33 hijuelos m<sup>-1</sup> L) y menor (9.86 hijuelos m<sup>-1</sup> L) valor respectivamente de esta variable (Cuadro 5). También para el efecto de fecha de muestreo (días después de la siembra DDS) se encontró diferencia, siendo 60 DDS cuando se contó el menor número de hijuelos (6.46 hijuelos m<sup>-1</sup> L) y a los 120 DDS se observó el mayor número de hijuelos (15.27 hijuelos m<sup>-1</sup> L), lo cual corrobora que el ciclo de plantilla fue más lento. La interacción Cv x fecha de muestreo fue no significativa. El número de hijuelos de la caña de azúcar en el área y condiciones del ISRCH depende del cultivar y la etapa de muestreo (DDS).

Cuadro 5. Análisis de la varianza (ANOVA) del número de hijuelos (No. m<sup>-1</sup> L) de tres cultivares (Cv) de caña de azúcar durante el ciclo plantilla.

DDS/Cv	MEX 69-290	CP 72-2086	MEX 79-431	Media DDS†
60	4.77 a	7.2 ab	7.4 ab	6.46 A
90	10.07 bc	12.63 cd	13.23 cd	11.98 B
120	14.73 cd	17.17 d	13.9 cd	15.27 C
Media Cv	9.86 a	11.51 ab	12.33 b	
C. V (%):	39.67			
Probabilidad de F:		DMS		
Cv	0.0317*	2.2		
DDS	0.0001**	2.2		
Cv x DDS	0.3331NS	5.0		

†Medias con una letra en común no son significativamente diferentes ( $p \leq 0.05$ ). Letras minúsculas representan diferencias horizontalmente y mayúsculas verticalmente. DDS = días después de la siembra, C. V. = Coeficiente de variación, NS = diferencia estadística no significativa  $p \leq 0.05$ , \*diferencia estadística significativa a  $p \leq 0.05$ , \*\* diferencia estadística significancia alta  $p \leq 0.01$ , DMS = diferencia media significativa.

Durante el ciclo soca se observó diferencia estadística significativa para el número de hijuelos en cuanto al efecto de cultivares, días después de la cosecha (DDC) y la interacción entre ambas

(Cuadro 6). El cultivar MEX 79-431 presentó el promedio más alto de número de hijuelos (26.16 hijuelos  $m^{-1}$  L) y MEX 69-290 el más bajo (20.15 hijuelos  $m^{-1}$  L).

En cuanto a las fechas de muestreo, no se encontró diferencia estadísticamente significativa entre los 30 y 60 DDC, la diferencia se cuantificó entre los 30 y 90 DDC, observándose el mayor número de hijuelos (24.1 hijuelos  $m^{-1}$  L) a los 60 DDC y el menor (21.1 hijuelos  $m^{-1}$  L) a los 90 DDC, lo cual indica el inicio de la formación de tallos y la eliminación de hijuelos a esta edad de los cultivares en este ciclo. El número de hijuelos por  $mL^{-1}$  observado en el presente trabajo para los cultivares evaluados, es inferior a 31 y 35 hijuelos a 120 DDS en plantilla y DDC en soca reportados por Marasca *et al.* (2015).

Durante el ciclo soca, los cultivares presentaron un incremento en el número de hijuelos, correspondiente al 104.3% para MEX 69-290, 97.2% para CP 72-2086 y 112.1% para MEX 79 431 con respecto al ciclo plantilla, lo cual se atribuye a que al inicio del ciclo soca la caña de azúcar cuenta ya con un sistema radicular establecido y permite la absorción temprana de agua y nutrientes del suelo.

Cuadro 6. Análisis de varianza del número de hijuelos (No.  $m^{-1}$  L) de tres cultivares (Cv) de caña de azúcar durante el ciclo soca en el área de abastecimiento del Ingenio Santa Rosalía de la Chontalpa.

DDC	Cv			Media DDC†
	MEX 69-290	CP 72-2086	MEX 79-431	
30	19.72 a	23.87 b	27.83 c	23.81 B
60	21.07 b	23.30 b	27.93 c	24.10 B
90	19.76 a	20.93 ab	22.7 ab	21.10 A
Media Cv	20.15 a	22.70 b	26.16 c	
C.V. (%):	12.92			
Valor de F:		DMS		
Cv	< 0.0001**	1.47094		
DDC	< 0.0001**	1.47094		
Cv x DDC	0.0145**	3.37417		

†Medias con una letra en común no son significativamente diferentes ( $p \leq 0.05$ ). Letras minúsculas representan diferencias horizontalmente y mayúsculas verticalmente. DDC= días después de la cosecha, C.V. = Coeficiente de variación, \*\* diferencia estadística significativa alta  $p \leq 0.01$ , DMS = diferencia media significativa.

Las Figuras 7A y 7B, muestran la línea de tendencia sigmoidea con el mejor ajuste a la dinámica del número de hijuelos de los tres cultivares de caña de azúcar durante los ciclos plantilla y soca, respectivamente, indicando buen desarrollo del cultivo a los 120 DDS en ciclo plantilla y a los 60 DDC en el ciclo soca, ya que el crecimiento fue más acelerado en este ciclo. Resultados similares fueron obtenidos por De Oliveira *et al.* (2010), quienes evaluaron seis cultivares brasileños de caña de azúcar.

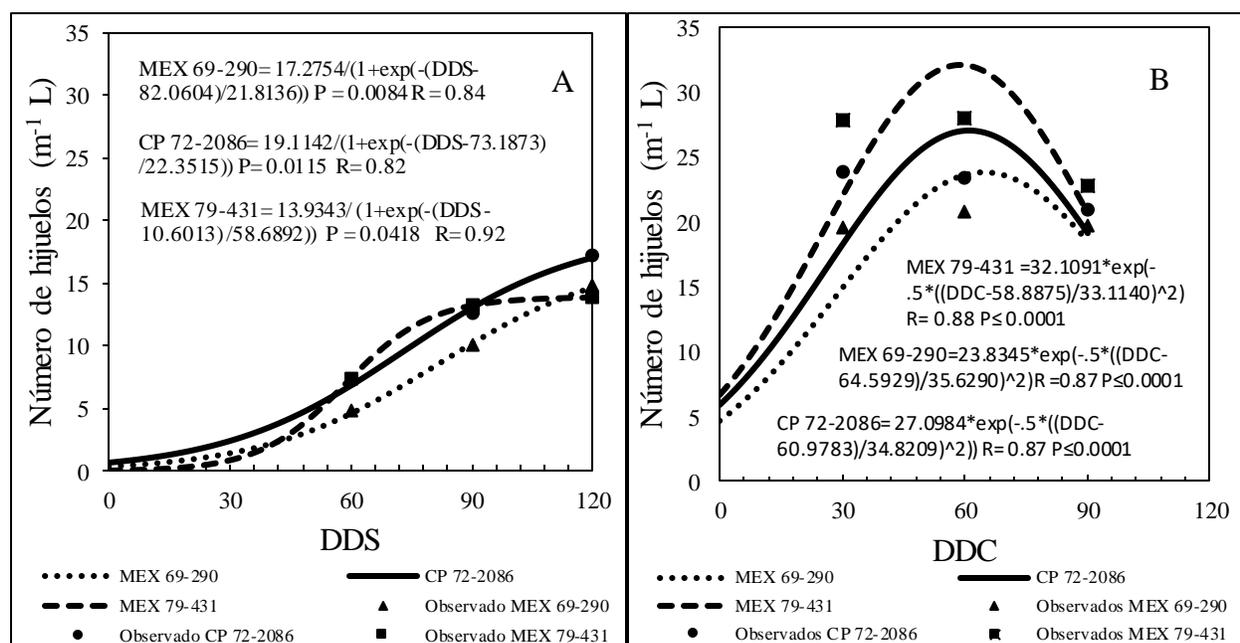


Figura 7. Línea de tendencia del número de hijuelos ( $m^{-1} L$ ) para tres cultivares de caña de azúcar, durante el ciclo plantilla (A) y soca (B), en el área de abastecimiento del Ingenio Santa Rosalía de la Chontalpa.

### 5.3.2. Número de tallos (tallos $m^{-1} L$ )

Durante el ciclo plantilla, la variable número de tallos mostró diferencia estadísticamente significativa para el efecto DDS y para la interacción CV x DDS (Cuadro 7). En cuanto a los DDS, solo hubo diferencia estadística entre los 150, 180 y 210 días, en los cuales se cuantificó un aumento del número de tallos conforme aumentó la edad del cultivo. Después de los 210 DDS y hasta la cosecha, el número de tallos permaneció constante durante los muestreos realizados, toda

vez que durante este tiempo no se estimó diferencia estadística significativa en esta variable. Los valores promedio del número de tallos fue de 12.0, 12.65 y 16.20 a los 450 DDS en ciclo plantilla y de 13.53, 14.7 y 12.97 a los 360 DDC en ciclo soca para MEX 69-290, CP 72-2086 y MEX 79-431, respectivamente, y son superiores a los reportados por De Oliveira *et al.* (2005) que fueron de 7.44, 9.02 y 8.64 tallos  $m^{-1} L$  para los cultivares RB 72454, RB 855113 y RB 855536, respectivamente, a los 328 DDS. En el caso de la CP 72-2086, Arreola-Enríquez *et al.* (2019), reportaron un valor promedio de 10 tallos por  $m^{-1} L$ .

La dinámica de producción de tallos mostró una tendencia de incremento desde los 150 DDS en el ciclo plantilla y 120 DDC en el ciclo soca hasta los 210 DDS, a partir de este último, se observó una estabilización hasta la cosecha, a excepción del cultivar MEX 79-431 durante el ciclo plantilla, que a partir de los 360 DDS y hasta la cosecha, mostró un ligero incremento en el número de tallos (Cuadro 7).

La producción de tallos de los tres cultivares de caña de azúcar y los dos ciclos evaluados, presentó el mejor ajuste con una línea de tendencia sigmoidea (Figura 8). Por el contrario, Abreu *et al.* (2013) encontraron una tendencia lineal cuadrática para la variable número de tallos a partir de los 60 DDS, en seis cultivares de caña de azúcar en los ciclos plantilla y soca.

Tomando como referencia el número de hijuelos a los 120 DDS y el número de tallos a los 450 DDS para los tres cultivares, se puede inferir que el 89.2% del número de hijuelos logró desarrollarse en tallos molederos durante el ciclo plantilla. Con respecto al ciclo soca, en base al número de hijuelos a los 60 DDC y el número de tallos a los 360 DDC, se logró la formación del 57.0% del número de hijuelos en tallos molederos.

La muerte de hijuelos o no formación de tallos industrializables del restante 10.8% durante el ciclo de plantilla y 43.0% en soca, fue causa de pérdida de productividad, si comparamos con los

Cuadro 7. Análisis de varianza del número de tallos (No. m<sup>-1</sup> L) de tres cultivares (Cv) de caña de azúcar durante el ciclo plantilla y soca en el área de abastecimiento del Ingenio Santa Rosalía de la Chontalpa.

<b>Ciclo plantilla</b>				
DDS x Cv	Cv			Media DDS†
	MEX 69 290	MEX 79-431	CP 72-2086	
150	7.75 ab	6.83 a	8.77 abc	7.78 A
180	9.54 abcd	10.93 bcdef	10.33 bcdef	10.27 B
210	12.96 defgh	12.13 cdefg	13.87 fgh	12.99 C
240	14.0 fgh	13.07 efgh	13.73 efgh	13.60 C
270	13.32 efgh	12.87 defgh	13.80 efgh	13.33 C
300	14.04 fgh	12.83 defgh	14.27 fgh	13.71 C
330	13.93 fgh	13.0 defgh	14.17 fgh	13.70 C
360	13.61 efgh	12.97 defgh	13.43 efgh	13.34 C
390	12.28 defg	13.73 efgh	14.30 fgh	13.31 C
420	12.14 cdefg	14.85 gh	12.65 defg	13.21 C
450	12.0 cdefg	16.20 h	12.65 defg	13.62 C
Media Cv	12.32 a	12.64 a	12.91 a	
C.V. (%):	18.42			
Probabilidad de F:		DMS		
Cv	0.1171 NS	0.63335		
DDS	0.0001**	1.69257		
Cv x DDS	0.0018 **	3.48264		
<b>Ciclo soca</b>				
DDC x Cv	Cv			Media DDC
	MEX 69 290	MEX 79-431	CP 72-2086	
120	7.30 a	9.03 ab	8.47 a	8.27 A
150	9.33 ab	11.67 bc	12.43 cd	11.14 B
180	12.53 cde	14.03 cdefg	13.3 cdefg	13.29 C
210	13.47 cdefg	14.37 defg	15.17 efg	14.33 CD
240	13.90 cdefg	14.87 defg	15.57 fg	14.78 D
270	14.60 defg	14.43 defg	15.73 g	14.92 D
300	14.03 cdefg	14.03 cdefg	15.43 fg	14.50 CD
330	14.33 defg	13.50 cdefg	15.60 fg	14.48 CD
360	13.53 cdefg	12.97 cdef	14.70 defg	13.73 CD
Media Cv	12.56 a	13.21 b	14.04 c	
C.V. (%):	14.73			
Probabilidad de F:		DMS		
Cv	< 0.0001**	0.55869		
DDC	< 0.0001**	1.28157		
Cv x DDC	0.0469*	2.64722		

†Medias con una letra en común no son significativamente diferentes ( $p \leq 0.05$ ). Letras minúsculas representan diferencias horizontalmente y mayúsculas verticalmente. DDS = días después de la siembra, DDC = días después de la cosecha, C.V. = Coeficiente de variación, NS= diferencia estadística no significativa a  $p \leq 0.05$ , \*diferencia estadística significativa a  $p \leq 0.05$ , \*\*diferencia estadística significativa alta a  $p \leq 0.01$ , DMS = diferencia media significativa.

14.6 tallos  $m^{-1} L$  para el cultivar MEX 79-431 reportados por Córdova Gamas *et al.* (2016), lo cual, se puede atribuir a diversos factores, entre ellos al efecto de sombreado que las plantas con mayor altura y cobertura ejercen sobre las más pequeñas y/o a la competencia con las arvenses *Cyperus rotundus* L., y *Rottboellia exaltata* L. (Arévalo *et al.*, 2011) y el déficit hídrico en las plantaciones observado en agosto 2019. Lo anterior plantea la necesidad de mejorar el manejo agronómico del cultivo de caña de azúcar en el ISRCH y el manejo del agua en el suelo, para evitar que se pierdan al menos 2 tallos  $m^{-1} L$ .

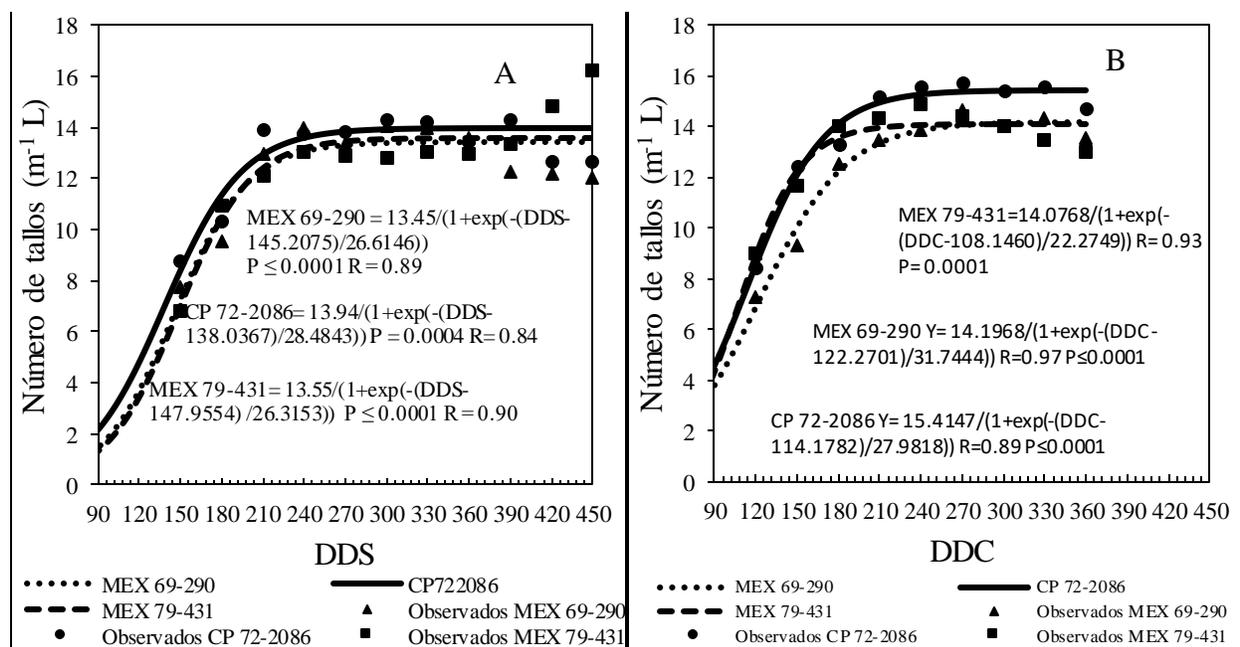


Figura 8. Línea de tendencia del número de tallos ( $m^{-1} L$ ) para tres cultivares de caña de azúcar, durante el ciclo plantilla (A) y soca (B), en el área de abastecimiento del Ingenio Santa Rosalía de la Chontalpa.

### 5.3.3. Altura de tallo (m)

Para la variable altura de tallos, durante el ciclo plantilla, se observaron diferencias estadísticas altamente significativas para el efecto cultivar, DDS y su interacción. El cultivar CP 72-2086 alcanzó la altura de tallos mayor (2.32 m) en comparación con los cultivares MEX 69-290 (2.08 m) y MEX 79-431 (2.03 m), que no presentaron diferencia estadística entre ellas. En cuanto a las

fechas de muestreo, se observó que el cultivar MEX 69-290 a los 360 DDS alcanzó su altura mayor (2.69 m), MEX 49-431 a los 390 DDS (2.86 m) y MEX 79-431 hasta los 420 DDS (2.32 m). Se observó un periodo de estacionalidad del crecimiento de tallos entre los 240 y 300 DDS, que coincidió con un periodo de disminución en la precipitación pluvial y aumento de la temperatura conocido como canícula, y otro a partir de los 330 DDS hasta la cosecha (época de sequía). Dichos valores son ligeramente inferiores a los encontrados (0.18 a 3.5 m) para 10 cultivares brasileños de caña de azúcar bajo diferentes láminas de riego (De Oliveira *et al.*, 2010).

En el caso de la interacción Cv x DDS para la variable altura de tallos se observaron diferencias estadísticamente significativas para el cultivar MEX 79-431 entre los 150 (0.77 m) y 240 (1.81 m) DDS y entre 270 (2.05 m) y 360 (2.75 m) DDS, a partir de este último, la altura de tallos se mantuvo constante, esto indicó el máximo crecimiento vegetativo. El cultivar MEX 69-290, presentó diferencias entre los muestreos realizados a los 150 (0.81 m) y 210 (1.66 m), y entre 240 (1.91 m) y 330 (2.6 m) DDS, y después de esta etapa, el crecimiento de los tallos se mantuvo estable indicando el fin de su periodo de crecimiento, resultando más precoz que el cultivar MEX 79-431 cuando se establece en diciembre (Cuadro 8). Al respecto, las etapas siguientes es el sazonado y la madurez, el tallo pierde humedad y los productos fotosintéticos se acumulan principalmente en forma de sacarosa (Xiao *et al.*, 2017).

El cultivar CP 72-2086, mostró diferencias en la variable altura de tallo entre los 150 (0.87 m) y 210 (1.63 m) DDS, entre los 210 y 330 (2.71 m) DDS, y entre los 330 y 420 (3.39 m) DDS (Cuadro 8). Durante el ciclo soca, para la variable altura de tallos se encontró diferencia estadística significativa para el efecto de cultivares y días después de la cosecha. El cultivar MEX 79-431 presentó el valor más bajo de altura de tallos (1.92 m), en comparación con el cultivar MEX 69-290 (2.0 m) y CP 72-2087 (2.08 m), entre las cuales no hubo diferencia estadística significativa.

Cuadro 8. Análisis de varianza de la altura de tallos (m) de tres cultivares (Cv) de caña de azúcar durante el ciclo plantilla y soca en el área de abastecimiento del Ingenio Santa Rosalía de la Chontalpa.

<b>ciclo plantilla</b>				
DDS x Cv	<b>Cv</b>			Media DDS†
	MEX 69-290	CP 72-2086	MEX 79-431	
150	0.81 a	0.87 a	0.77 a	0.82 A
180	1.22 ab	1.34 ab	0.98 a	1.18 B
210	1.66 bcde	1.63 bc	1.38 ab	1.56 C
240	1.91d	1.83 bcde	1.81 bcde	1.91 D
270	2.09 cdefg	2.11 cdefg	2.05 cdef	2.14 D
300	2.28 defghi	2.2 cdefgh	2.06 cdef	2.18 D
330	2.6 fghijk	2.71 ghijk	2.51 fghijk	2.61 E
360	2.69 ghijk	2.95 jkl	2.75 hijk	2.8 E
390	2.46 fghijk	3.05 kl	2.86 ijkl	2.79 E
420	2.51 fghijk	3.39 l	2.7 ghijk	2.87 E
450	2.36 efghij	3.39 l	2.41 efghij	2.72 E
Media Cv	2.08a	2.32b	2.03a	
C.V. (%):	19.86			
Probabilidad de F:		DMS		
Cv	0.0001**	0.11358		
DDS	0.0001**	0.30355		
Cv x DDS	0.0001**	0.62458		
<b>Ciclo soca</b>				
DDC x Cv	<b>Cv</b>			Media DDC
	MEX 69-290	CP 72-2086	MEX79-431	
120	0.81 a	0.98 abc	0.88 ab	0.89 A
150	1.09 abcd	1.37 cde	1.13 abcd	1.19 B
180	1.32 bcde	1.49 def	1.31 bcde	1.37 B
210	1.53 def	1.92 fgh	1.61 efg	1.69 C
240	2.09 ghi	2.05 ghi	1.93 fgh	2.02 D
270	2.43 ijk	2.22 hij	2.19 hij	2.28 E
300	2.63 jklm	2.67 jklmn	2.5 ijkl	2.60 F
330	2.97 lmn	3.02 mn	2.76 klmn	2.92 G
360	3.12 n	3.05 n	3.02 mn	3.06 G
Media Cv	2.00 b	2.08 b	1.92 a	
C.V. (%):	17.17			
Probabilidad de F:		DMS		
Cv	0.0012**	0.10133		
DDC	< 0.0001**	0.23244		
Cv x DDC	0.2873 NS	0.48014		

†Medias con una letra en común no son significativamente diferentes ( $p \leq 0.05$ ). Letras minúsculas representan diferencias horizontalmente y mayúsculas verticalmente. DDS = días después de la siembra, DDC= días después de la cosecha, C.V.= Coeficiente de variación, NS = diferencia estadística no significativa a  $p \leq 0.05$ , \*\* diferencia estadística significativa alta a  $p \leq 0.01$ , DMS = diferencia media significativa.

En cuanto a las fechas de muestreo, el valor mayor para altura de tallos (3.02 a 3.12 m) en los tres cultivares, se observó a 360 DDC, aunque sin diferencia estadística significativa a los 330 DDC. El comportamiento de los valores obtenidos de esta variable fue similar a lo reportado por Silva *et al.* (2012) para el cultivar SP 716949.

En el ciclo de soca, la altura de tallo a los 360 DDC en los cultivares MEX 69-290 (3.12 m) y MEX 79-431(3.02 m) fue mayor en comparación al ciclo de plantilla, caso contrario de CP 72-2086 (3.05 m). La altura de tallos para los tres cultivares y los dos ciclos presentó el mejor ajuste con una línea de tendencia sigmoidea (Figura 9). Sin embargo, Abreu *et al.* (2013) encontraron una tendencia lineal para la variable altura de tallos en seis cultivares de caña de azúcar evaluados en ciclo plantilla y soca.

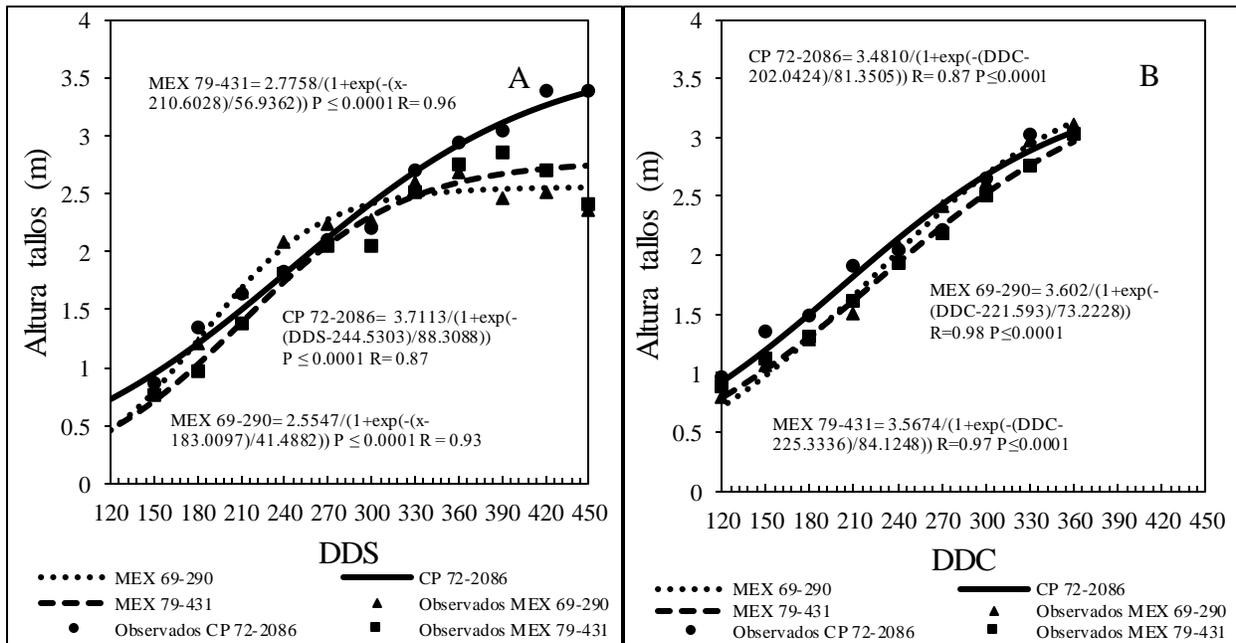


Figura 9. Línea de tendencia de la altura de tallos para tres cultivares de caña de azúcar, durante el ciclo plantilla (A) y soca (B), en el área de abastecimiento del Ingenio Santa Rosalía de la Chontalpa.

Considerando los valores de altura de tallos, se calculó la tasa de elongación de tallo (TET) de los cultivares de caña de azúcar, en los cuales se observó una TET máxima de  $15.4 \text{ mm día}^{-1}$  a los

180 DDS en el ciclo de plantilla y 12.3 mm día<sup>-1</sup> a los 210 DDC durante el ciclo de soca para el cultivar MEX 69-290, 12.1 y 10.5 mm día<sup>-1</sup> a los 210 DDS durante el ciclo plantilla y soca, para el cultivar MEX 79-431, mientras que el cultivar CP 72-2086 alcanzó una TET de 10.5 mm día<sup>-1</sup> a los 240 DDS en el ciclo de plantilla y 10.7 mm día<sup>-1</sup> a 210 DDC durante el ciclo de soca (Figura 10), estos valores son similares a los reportados por De Oliveira *et al.* (2010) para los cultivares SP 78-4764, SP79-1011, RB813804 y RB943365.

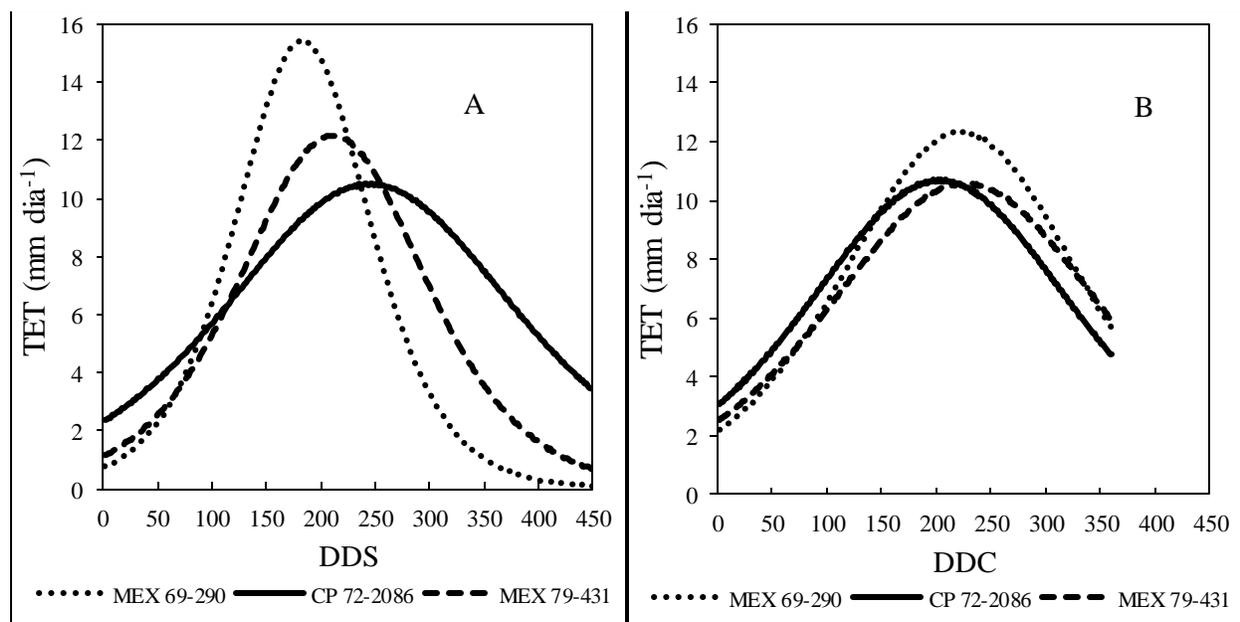


Figura 10. Tasa de elongación de tallos (TET) de tres cultivares de caña de azúcar, durante el ciclo plantilla (A) y soca (B) en la zona de abastecimiento del Ingenio Santa Rosalía de la Chontalpa.

#### 5.3.4. Diámetro de tallo (mm)

Para la variable diámetro de tallos, en los cultivares de caña de azúcar (Cv) durante los ciclos de plantilla y soca, se encontró diferencia estadística significativa para la etapa de muestreo (DDS) y la interacción Cv x DDS. El cultivar MEX 79-431 (29.10) presentó el diámetro de tallo mayor en comparación con el cultivar MEX 69-290 (27.36) y la CP 72-2086 (27.27), entre estos dos últimos cultivares no se observó diferencia estadística significativa durante el ciclo de plantilla

(Cuadro 9), MEX 69-290 fue el cultivar que presentó el valor menor para la variable diámetro de tallo (25.3 mm) durante el ciclo de soca (Cuadro 9).

En cuanto a las fechas de muestreo, se observó, en general, que esta variable disminuyó conforme a la edad del cultivo, este comportamiento se observó de los 150 hasta los 210 DDS durante el ciclo plantilla y de los 120 hasta los 180 DDC durante el ciclo soca, período en que se presentó la “canícula”. A partir de estos muestreos y hasta la cosecha, no se observó diferencia estadística significativa. En este trabajo, los valores de diámetro de tallos fueron similares a los reportados por De Oliveira *et al.* (2010), para 10 cultivares de caña de azúcar, bajo diferentes niveles de riego en Brasil. Pero indican que al cultivo de caña le faltó humedad para incrementar el diámetro de tallo al menos a 32 mm, como lo señalaron Viveros *et al.* (2015).

En relación a la simulación del diámetro de tallos se estimó el mejor ajuste con una línea de tendencia polinomial inversa de segundo orden (Figura 11). La sequía presente durante el periodo de “canícula” redujo el diámetro de tallo, esto coincide con lo descrito por Rodríguez *et al.* (2015) quienes señalaron que el déficit hídrico provocado por los tratamientos de sequía redujo en promedio 71% el diámetro de tallo moledero en comparación con el tratamiento testigo. Los cultivares presentaron un descenso en el diámetro de tallos, correspondiente al 7.5% para MEX 69-290, 5.4% para CP 72-2086 y 6.1% para MEX 79 431, con respecto al ciclo plantilla.

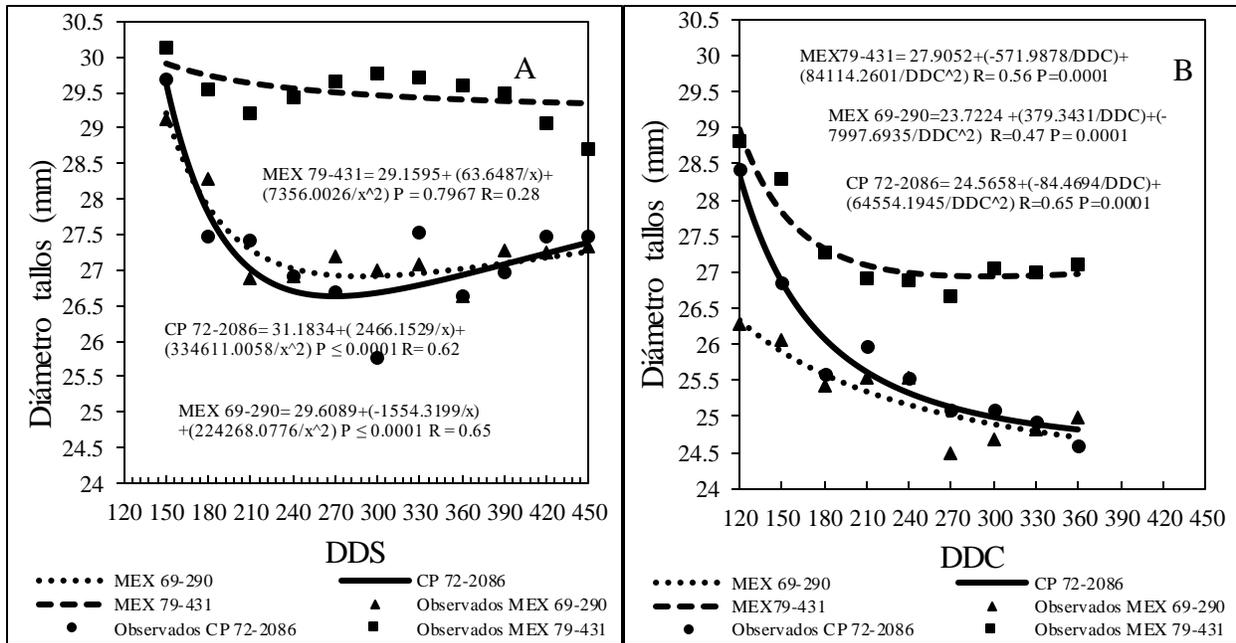


Figura 11. Línea de tendencia del diámetro de tallos (mm) para tres cultivares de caña de azúcar, durante el ciclo plantilla (A) y soca (B), en el área de abastecimiento del Ingenio Santa Rosalía de la Chontalpa.

Por otro lado, la variable diámetro de tallos presentó una reducción en el ciclo de plantilla en comparación con el ciclo de soca, similar a lo observado respecto a la variable altura, esto demostró que tanto los factores climáticos (Rodríguez *et al.*, 2015) y edafológicos del área y época de estudio, así como el manejo de las plantaciones y la quema de la caña para la cosecha (García *et al.*, 2018) limitan el crecimiento del cultivo de caña de azúcar, en los ciclos subsiguientes.

Cuadro 9. Análisis de varianza del diámetro de tallos (mm) de tres cultivares (Cv) de caña de azúcar durante el ciclo plantilla y soca en el área de abastecimiento del Ingenio Santa Rosalía de la Chontalpa.

<b>Ciclo plantilla</b>				
Cv x DDS	Cv			Media DDS†
	MEX 69-290	CP 72-2086	MEX 79-431	
150	29.12 de	29.67 e	29.87 e	29.55 C
180	28.28 cd	27.47 bc	29.08 de	28.28 B
210	26.89 ab	27.40 bc	28.95 de	27.75 AB
240	26.92 ab	26.91 ab	28.97 de	27.60 A
270	27.19 bc	26.70 ab	29.29 de	27.73 AB
300	26.99 abc	25.76 a	29.39 de	27.38 A
330	27.08 abc	27.54 bc	29.20 de	27.94 AB
360	26.63 ab	26.64 ab	29.17 de	27.48 A
390	27.27 bc	26.97 abc	28.96 de	27.7A AB
420	27.26 bc	27.47 bc	29.01 de	27.91 AB
450	27.33 bc	27.47 bc	28.26 cd	27.69 AB
Media Cv	27.36a	27.27a	29.10 b	
C.V. (%):	3.06			
Probabilidad de F:		DMS		
Cv	0.0001**	0.23975		
DDS	0.0001**	0.63979		
Cv*DDS	0.0001**	1.32489		
<b>Ciclo soca</b>				
Cv x DDS	Cv			Media DDC
	MEX 69-290	CP 72-2086	MEX 79-431	
120	26.28 cdefgh	28.42 jk	28.80 k	27.83 D
150	26.01 bcdefgh	26.86 efghi	28.28 ijk	27.05 C
180	25.36 abcd	25.59 abcdefg	27.28 hij	26.07 AB
210	25.53 abcde	25.99 bcdefgh	26.92 efghi	26.15 B
240	25.53 abcde	25.55 abcdef	26.89 efghi	25.99 AB
270	24.49 a	25.10 abc	26.65 defgh	25.41 A
300	24.70 ab	25.11 abc	27.06 ghij	25.62 AB
330	24.83 abc	24.92 abc	27.00 fghij	25.58 AB
360	24.98 abc	24.61 ab	27.11 hij	25.57 AB
Media Cv	25.30 a	25.79 b	27.33 c	
C.V. (%):	4.15			
Probabilidad de F:		DMS		
Cv	< 0.0001**	0.31021		
DDC	< 0.0001**	0.71162		
Cv x DDC	0.0034**	1.47008		

†Medias con una letra en común no son significativamente diferentes ( $p \leq 0.05$ ). Letras minúsculas representan diferencias horizontalmente y mayúsculas verticalmente. DDS = días después de la siembra, DDC = días después de la cosecha, C.V. = Coeficiente de variación, \*\*diferencia estadística significativa alta a  $p \leq 0.01$ , DMS= diferencia media significativa.

## **5.4. Rendimiento de tallos y acumulación de materia seca ( $t\ ha^{-1}$ )**

### **5.4.1. Rendimiento de tallos ( $t\ ha^{-1}$ )**

El rendimiento de los tres cultivares de caña de azúcar mostró diferencia estadística significativa para el efecto cultivar (Cv), fecha de muestreo (DDS) y la interacción Cv x DDS (Cuadro 10). Durante el ciclo plantilla, el rendimiento de tallos de los cultivares MEX 69-290 y MEX 79-431 a los 180 DDS fue afectado por la sequía (Figura 3), con el inicio de la época de lluvia el rendimiento se incrementó y alcanzó su máximo valor a los 360 DDS, fecha en que debería cosecharse para evitar pérdidas en el rendimiento de tallos, como se observó a los 450 DDS. Durante el ciclo soca, el rendimiento de tallos mayor se observó a los 360 DDC. Después de que terminó el periodo de crecimiento el proceso que sigue es sazonado y madurez, el tallo pierde humedad y los productos fotosintéticos se acumulan principalmente en forma de sacarosa (Xiao *et al.*, 2017), por ello es necesario cosechar los tallos con el mayor contenido de sacarosa (Salgado *et al.*, 2013).

En el ciclo plantilla, el rendimiento de tallos de los cultivares de caña de azúcar a los 450 DDS presentó el orden de producción siguiente CP 72-2086>MEX 79-431>MEX69-290 con 144.73, 130.09 y 94.18  $t\ ha^{-1}$ , respectivamente. Contrariamente, durante el ciclo soca a los 360 DDC, el cultivar MEX 69-290 presentó mayor rendimiento de tallos (102.21  $t\ ha^{-1}$ ), seguido de los cultivares MEX 79-431 (98.81  $t\ ha^{-1}$ ) y CP 72-2086 (87.46  $t\ ha^{-1}$ ).

En base a los valores promedios de producción de tallos, los cultivares de caña de azúcar en el ciclo soca en comparación con el ciclo de plantilla, presentaron una reducción del rendimiento correspondiente al 14.5, 30.9 y 32.5% para MEX 69-290, MEX 79-431 y CP 72-2086, respectivamente. Esta reducción se atribuyó a pérdida de población en el surco, ya que no se realiza la práctica de resiembra y a la necesidad de aplicar riegos de auxilio.

Cuadro 10. Rendimiento de tallos ( $t\ ha^{-1}$ ) de tres cultivares de caña de azúcar, durante el ciclo plantilla y soca, en el área de abastecimiento del Ingenio Santa Rosalía de la Chontalpa.

<b>Ciclo plantilla</b>				
DDS x Cv	Cv			Media DDS†
	MEX 69-290	CP 72-2086	MEX 79-431	
90	49.68 a	44.92 a	46.18 a	46.93 A
180	50.78 a	75.50 ab	48.23 a	58.17 A
270	104.34 bcd	97.51 bc	127.28 cde	109.71 B
360	125.74 cde	124.85 cde	153.66 e	134.75 C
450	94.18 bc	144.73 de	130.09 cde	123.0 BC
Media Cv	84.95 a	97.5 ab	101.34 b	
C.V. (%):	33.54			
Probabilidad de F:	DMS			
Cv	0.0178**	13.01876		
DDS	<0.0001**	19.74427		
Cv x DDS	0.0013**	43.28938		
<b>Ciclo soca</b>				
DDS x Cv	Cv			Media DDC
	MEX 69-290	CP 72-2086	MEX 79-431	
180	37.41 a	38.28 a	39.41 a	38.37 A
270	78.37 bc	71.61 b	71.92 b	73.96 B
360	102.21 d	87.46 c	98.81 d	96.16 C
Media Cv	72.66 b	65.78 c	70.05 b	
C.V. (%):	13.09			
Probabilidad de F:	DMS			
Cv	0.0020**	4.50300		
DDC	<0.0001**	4.50300		
Cv x DDC	0.0090**	10.32936		

†Medias con una letra en común no son significativamente diferentes ( $p \leq 0.05$ ). Letras minúsculas representan diferencias horizontalmente y mayúsculas verticalmente. DDS = días después de la siembra, DDC = días después de la cosecha, C.V.= Coeficiente de variación, \*\*diferencia estadística significativa alta a  $p \leq 0.01$ , DMS= diferencia media significativa.

Durante el ciclo plantilla, la dinámica de acumulación del rendimiento por los cultivares de caña de azúcar (Figura 12A), mostró un comportamiento similar durante los muestreos a los 90, 180, 270 y 360 DDS, sin embargo, en el muestreo realizado a la cosecha, el cultivar MEX 69-290 mostró un descenso significativo en comparación con los otros dos cultivares, entre los cuales no hubo diferencia estadística significativa. En el ciclo soca, el rendimiento de tallos se incrementó

conforme a la edad del cultivar, presentando una dinámica similar a la del ciclo plantilla, pero con valores promedio menores (Figura 12B).

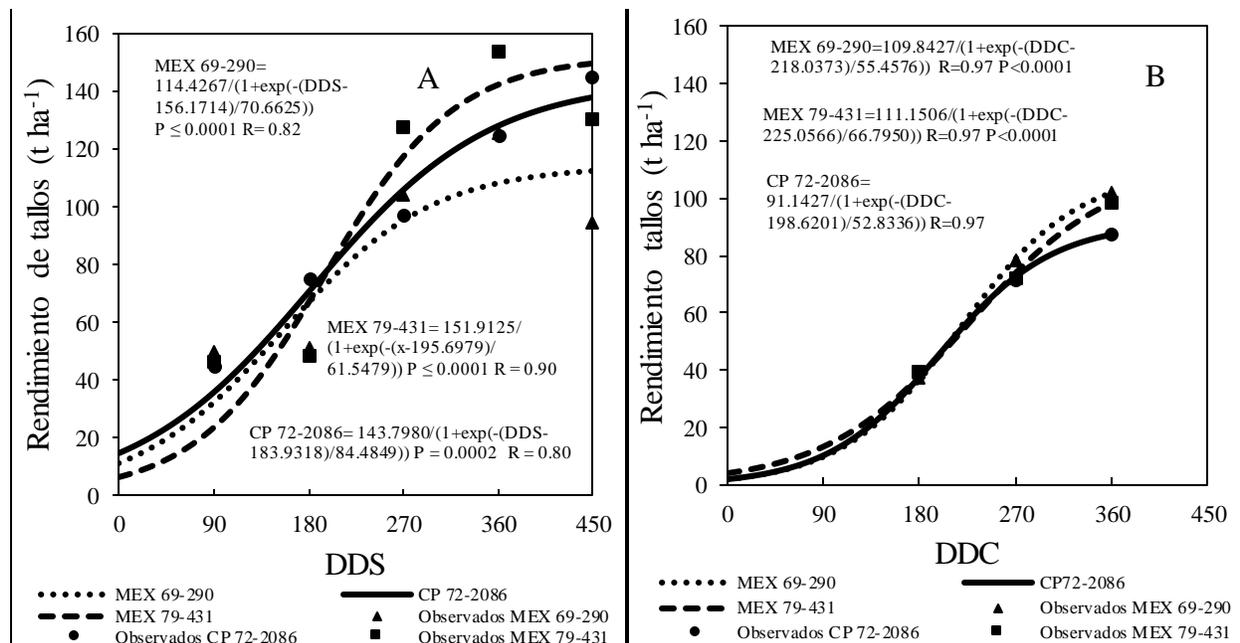


Figura 12. Línea de tendencia del rendimiento de tallos (t ha<sup>-1</sup>) de tres cultivares de caña de azúcar durante el ciclo plantilla (A) y soca (B) en el área de abastecimiento del Ingenio Santa Rosalía de la Chontalpa.

#### 5.4.2. Materia seca de tallos (MST)

Durante los dos ciclos de muestreo (plantilla y soca), la variable materia seca de tallos (MST) mostró diferencia estadística significativa entre cultivares (Cv), la fecha de muestreo (DDS) y (DDC) y la interacción entre ambos factores (Cuadro 11). Durante el ciclo plantilla, el cultivar MEX 69-290 presentó la MST menor con 21.75 t ha<sup>-1</sup> en comparación con los cultivares CP 72-2086 (25.39 t ha<sup>-1</sup>) y MEX 79-431 (25.49 t ha<sup>-1</sup>). Contrariamente, durante el ciclo soca, el cultivar MEX 69-290 mostró el valor de MST mayor (19.4 t ha<sup>-1</sup>). Entre los cultivares MEX 79-431 y CP 72-2086 no se encontró diferencia estadística significativa en los dos ciclos (plantilla y soca). Los valores de MST reportados en el presente trabajo fueron similares a los reportados por Palma-

López *et al.* (2002), para el cultivo de caña de azúcar en diferentes unidades de suelo en Tabasco (19.42 a 30.75 t ha<sup>-1</sup>).

Asimismo, para la variable MST, en cuanto a la fecha de muestreo, durante el ciclo plantilla, no se estimó diferencia entre los 90 y los 180 DDS, así como entre los 360 y 450 DDS. Las diferencias cuantificadas en MST entre los muestreos a los 180, 270 y 360 DDS, principalmente, fueron causados por el efecto benéfico de la lluvia. Mientras que, en el ciclo soca, sí se estimó diferencia estadística significativa entre las fechas de muestreo, encontrándose el valor de MST menor a los 120 DDC (8.74 t ha<sup>-1</sup>) y la mayor acumulación de MST a los 360 DDC (36.78 t ha<sup>-1</sup>).

En el ciclo plantilla, la dinámica de acumulación de MST por los cultivares de caña de azúcar mostró similar comportamiento en los muestreos a los 90, 180, 270 y 360 DDS (Figura 13A), sin embargo, el cultivar MEX 69-290 a la cosecha mostró un descenso significativo en comparación con los otros cultivares, cuya MST fue similar a las 40 t ha<sup>-1</sup>, reportada para el cultivar MEX 79-431 (Córdova-Gamas *et al.*, 2016). De los 90 a los 180 DDS, se observó que la MST detuvo su crecimiento por efecto de la sequía (Figura 3). Los valores obtenidos para esta variable, en el presente trabajo fueron ligeramente inferiores a los encontrados por De Oliveira *et al.* (2010), quienes reportaron valores de 8.0 a 72.0 t ha<sup>-1</sup> durante el ciclo de cultivo en cultivares de maduración precoz, media y tardía. Sin embargo, la dinámica fue similar a la descrita por dichos investigadores para 11 cultivares de caña de azúcar en Brasil.

La dinámica de acumulación de MST en el ciclo soca, fue similar a la del ciclo plantilla, aunque con valores menores (Figura 13B), mostrando una disminución en la producción de MST correspondiente al 10.8, 30.3 y 33.4% con respecto al ciclo plantilla para los cultivares MEX 69-290, MEX 79-431 y CP 72-2086, respectivamente.

Cuadro 11. Materia seca de tallos (t ha<sup>-1</sup>) de tres cultivares de caña de azúcar, durante el ciclo plantilla y soca, en el área de abastecimiento del Ingenio Santa Rosalía de la Chontalpa.

<b>Ciclo plantilla</b>				
DDS x Cv	Cv			Media DDS†
	MEX 69-290	CP 72-2086	MEX 79-431	
90	8.84a	9.47a	7.92a	8.74 A
180	10.65a	16.18ab	8.78a	11.87 A
270	25.35bc	25.87bc	29.72cd	26.98 B
360	35.60cde	34.85cde	39.87de	36.78 C
450	28.30c	40.57de	41.17e	36.68 C
Media Cv	21.75 a	25.39 b	25.49 b	
C.V. (%):	33.91			
Probabilidad de F:	DMS			
Cv	0.0200**	3.29202		
DDS	<0.0001**	4.99269		
Cv x DDS	0.0082**	10.94649		
<b>Ciclo soca</b>				
DDC x Cv	Cv			Media DDC
	MEX 69-290	CP 72-2086	MEX 79-431	
180	9.10 a	9.52 a	9.21 a	9.28 A
270	21.10 c	17.85 b	17.53 b	18.83 B
360	27.98 e	23.33 cd	26.53 de	25.95 C
Media Cv	19.40 b	16.90 a	17.76 a	
C.V. (%):	15.65			
Probabilidad de F:	DMS			
Cv	0.0002**	1.39545		
DDC	<0.0001**	1.39545		
Cv x DDC	0.0019**	3.20101		

†Medias con una letra en común no son significativamente diferentes ( $p \leq 0.05$ ). Letras minúsculas representan diferencias horizontalmente y mayúsculas verticalmente. DDS = días después de la siembra, DDC = días después de la cosecha, C.V. = Coeficiente de variación, \*\*diferencia estadística significativa alta a  $p \leq 0.01$ , DMS = diferencia media significativa.

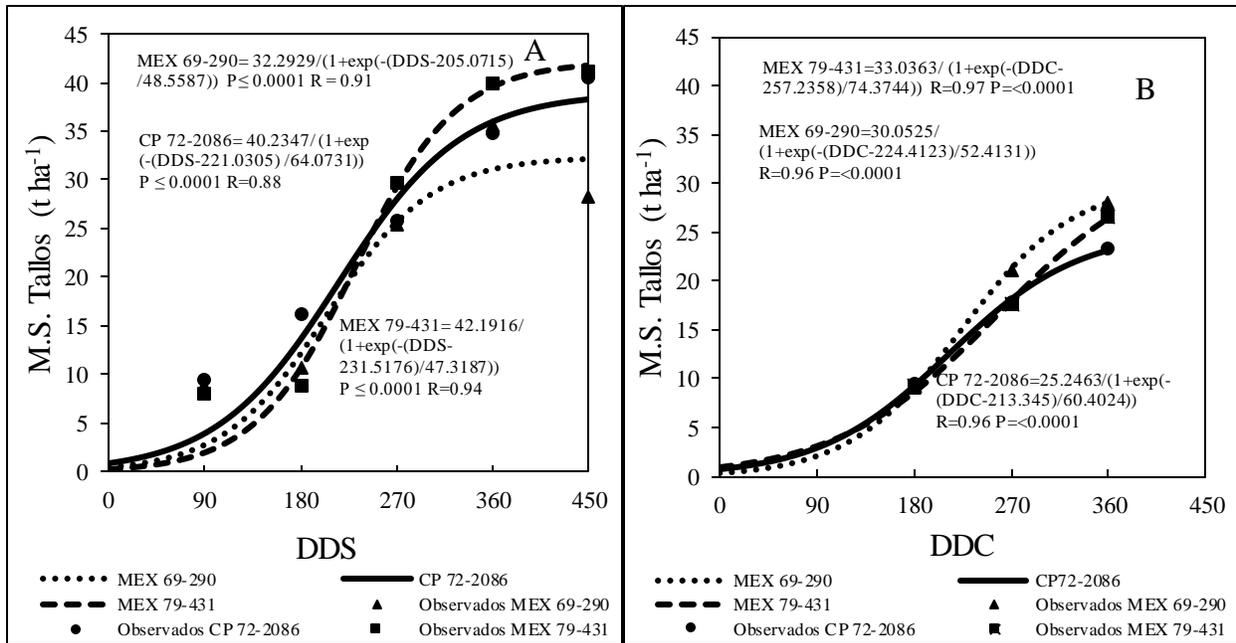


Figura 13. Línea de tendencia sigmoidea y dinámica de acumulación de materia seca de tallos ( $t\ ha^{-1}$ ) de tres cultivares de caña de azúcar durante el ciclo plantilla (A) y soca (B) en el área de abastecimiento del Ingenio Santa Rosalía de la Chontalpa.

#### 5.4.3. Materia seca de hojas (MSH)

Los datos de MSH mostraron diferencias estadísticamente significativas para el efecto cultivar, fecha de muestreo y la interacción entre ambas para los dos ciclos evaluados (Cuadro 12). En cuanto a los cultivares, durante el ciclo plantilla, solo se encontró diferencia entre CP 72-2086 y MEX 79-431, los cuales presentaron el menor ( $10.81\ t\ ha^{-1}$ ) y mayor valor ( $12.2\ t\ ha^{-1}$ ) para esta variable. Para el ciclo soca, contrariamente a lo observado en el ciclo plantilla, CP 72-2086, fue el cultivar que presentó mayor acumulación de materia seca de hojas ( $13.0\ t\ ha^{-1}$ ) y MEX 69-290, la más baja ( $11.8\ t\ ha^{-1}$ ), aunque esta no fue diferente de MEX 79-431, que produjo en promedio  $12.13\ t\ ha^{-1}$ .

La variable materia seca de hojas (MSH) mostró diferencia estadística significativa para el efecto cultivar (Cv), fecha de muestreo (DDS) y la interacción Cv x DDS para los ciclos de plantilla y soca (Cuadro 12). En cuanto a los cultivares de caña de azúcar, durante el ciclo plantilla, solo se encontró diferencia estadística significativa entre los cultivares CP 72-2086 y MEX 79-431, los

cuales presentaron los valores menores ( $10.81 \text{ t ha}^{-1}$ ) y mayores ( $12.2 \text{ t ha}^{-1}$ ) de MSH. Contrariamente, para el ciclo soca en comparación con en el ciclo plantilla, el cultivar CP 72-2086 presentó el valor de MSH mayor ( $13.0 \text{ t ha}^{-1}$ ) y el cultivar MEX 69-290, el valor menor ( $11.8 \text{ t ha}^{-1}$ ), similar estadísticamente al cultivar MEX 79-431 ( $12.13 \text{ t ha}^{-1}$ ).

Para las fechas de muestreo, durante el ciclo plantilla, se encontraron diferencias de MSH entre los muestreos a los 90, 270 y 450 DDS, mientras que, en el ciclo soca, no se observó diferencia estadística significativa entre los muestreos a los 270 y 360 DDC (Cuadro 12). Los valores cuantificados de MSH fueron ligeramente inferiores a los reportados por Salgado-García *et al.* (2014), quienes mostraron que la paja seca producida por parcela fue en promedio  $18.2 \text{ t ha}^{-1}$ , mientras que por cultivar de caña el rendimiento varió entre  $12.7$  y  $21.2 \text{ t ha}^{-1}$ , para caña de azúcar en diferentes unidades de suelo en Tabasco. Lo anterior indica que el cultivo de caña de azúcar produjo menos follaje, siendo benéfico para la producción de tallos. El cultivar MEX 69-290 presentó un incremento de MSH de apenas 3.0% en el ciclo soca con respecto al ciclo plantilla, mientras que para el cultivar CP 72-2086 fue de 16.8% y MEX 79-431 presentó una producción de MSH similar en ambos ciclos.

Observaciones sobre la dinámica de MSH demostraron que la acumulación de hojas se detuvo en el periodo de 90 a 180 DDS (Figura 14A) por efecto de la sequía (Figura 3), aunque, posteriormente la acumulación se reanudó de manera similar. Dicho efecto se observó en el ciclo soca de los 270 a 360 DDC (Figura 14B). No obstante, los valores de MSH obtenidos para esta variable fueron ligeramente superiores a los cuantificados por De Oliveira *et al.* (2010), quienes reportaron una producción de  $7.5$  a  $12.0 \text{ t ha}^{-1}$  para 10 cultivares de caña de azúcar. La dinámica es similar a la descrita por dichos investigadores.

Cuadro 12. Materia seca de hojas ( $t\ ha^{-1}$ ) de tres cultivares de caña de azúcar durante el ciclo plantilla y soca, en el área de abastecimiento del Ingenio Santa Rosalía de la Chontalpa.

<b>Ciclo plantilla</b>				
DDS x Cv	Cv			Media DDS†
	MEX 69-290	CP 72-2086	MEX 79-431	
90	8.48 ab	7.14 a	9.21 abc	8.28 A
180	8.74 ab	7.41 a	9.30 abc	8.49 A
270	10.56 abcd	9.55 abc	14.15 de	11.42 B
360	15.78 e	15.02 de	16.35 e	15.71 D
450	13.71 cde	14.92 de	11.97 bcde	13.53 C
Media Cv	11.45ab	10.81a	12.20b	
C.V. (%):	28.59			
Probabilidad de F:	DMS			
Cv	0.0508*	1.35854		
DDS	0.0001**	2.06036		
Cv x DDS	0.0278**	4.51734		
<b>Ciclo soca</b>				
DDS x Cv	Cv			Media DDC
	MEX 69-290	CP 72-2086	MEX 79-431	
180	10.72 a	10.91 ab	13.04 cde	11.56 A
270	12.66 bcde	13.76 de	11.88 abc	12.62 B
360	12.03 abcd	14.34 e	11.47 abc	12.77 B
Media Cv	11.80 a	13.00 b	12.13 a	
C.V. (%):	13.0			
Probabilidad de F para:	DMS			
Cv	0.0016**	0.79233		
DDC	0.0008**	0.79233		
Cv x DDC	<0.0001**	1.81751		

†Medias con una letra en común no son significativamente diferentes ( $p \leq 0.05$ ). Letras minúsculas representan diferencias horizontalmente y mayúsculas verticalmente. DDS = días después de la siembra, DDC = días después de la cosecha, C.V.= Coeficiente de variación, \*diferencia estadística significativa  $p \leq 0.05$ , \*\*diferencia estadística significativa alta a  $p \leq 0.01$ , DMS = diferencia media significativa.

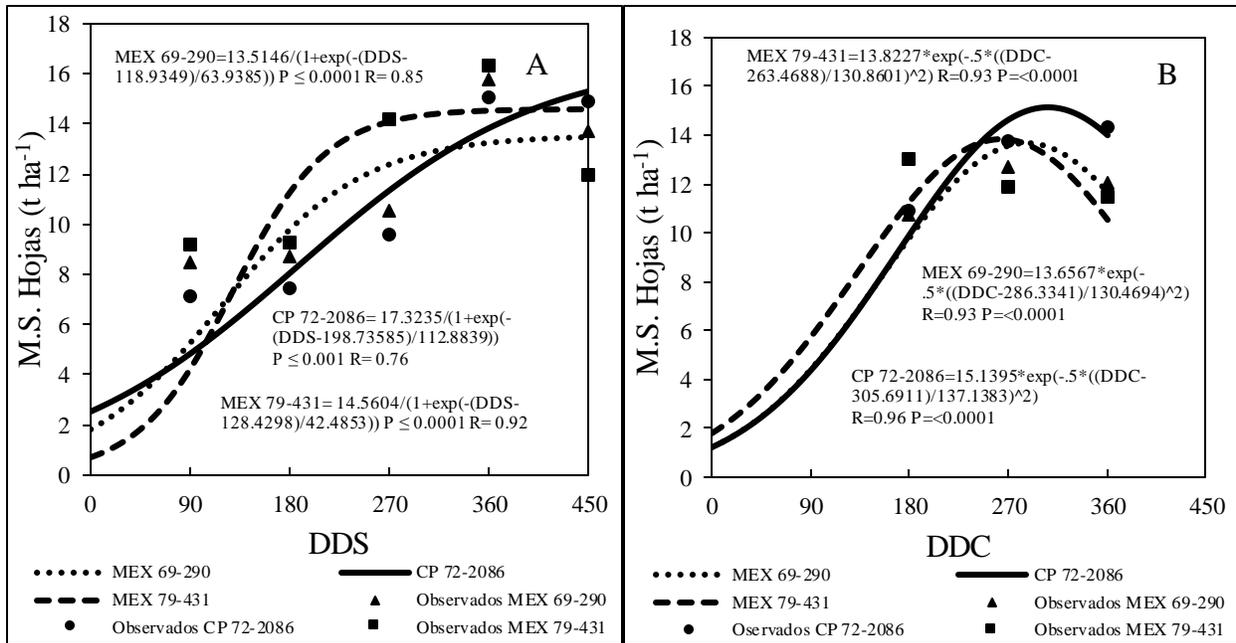


Figura 14. Línea de tendencia sigmoidea y dinámica de acumulación de materia seca de hojas ( $t \text{ ha}^{-1}$ ) de tres cultivares de caña de azúcar durante el ciclo plantilla (A) y soca (B) en el área de abastecimiento del Ingenio Santa Rosalía de la Chontalpa.

#### 5.4.4. Materia seca total (MSTo)

Referente a la variable materia seca total (MSTo) se observó diferencia estadística significativa para el efecto de cultivar (Cv), fecha de muestreo (DDC), solamente en el ciclo plantilla, y la interacción Cv x DDC (Cuadro 13). Durante el ciclo plantilla, el cultivar MEX 69-290 presentó el valor de MSTo menor con  $33.2 t \text{ ha}^{-1}$ , mientras que los cultivares CP 72-2086 y MEX 79-431 no mostraron diferencia estadística ( $36.19$  y  $37.69 t \text{ ha}^{-1}$ , respectivamente). Estos valores de MSTo fueron menores en comparación con los reportados por Palma-López *et al.* (2002) para caña de azúcar en diferentes unidades de suelo en Tabasco. En cuanto a la fecha de muestreo, no se observó diferencia estadística entre los 90 y los 180 DDS, así como entre 360 y 450 DDS. Aunque, se observó diferencia estadística entre los muestreos realizados a los 180, 270 y 360 DDS, en el ciclo plantilla. Durante el ciclo soca, el valor de MSTo menor se observó en el muestreo realizado a los 180 DDC ( $20.81 t \text{ ha}^{-1}$ ) y el valor de MSTo máximo se registró a los 360 DDC ( $39.41 t \text{ ha}^{-1}$ )

Durante el ciclo soca, los cultivares de caña de azúcar presentaron una disminución de la MSTo correspondiente al 9.5, 13.7 y 19.2% para MEX 69-290, CP 72-2086 y MEX 79-431, respectivamente, con respecto al ciclo plantilla (Cuadro 13).

La dinámica de acumulación de materia seca total (Figura 15), muestra como los cultivares se comportaron de manera similar durante ambos ciclos de cultivo, aunque con valores menores durante el ciclo soca.

Cuadro 13. Materia seca total ( $t\ ha^{-1}$ ) de tres cultivares de caña de azúcar, durante el ciclo plantilla y soca, en el área de abastecimiento del Ingenio Santa Rosalía de la Chontalpa.

<b>Ciclo plantilla</b>				
	<b>Cv</b>			
DDS x Cv	MEX 69-290	CP 72-2086	MEX 79-431	Media DDS†
90	17.31 a	16.61 a	17.13 a	17.02 A
180	19.39 a	23.58 ab	18.08 a	20.35 A
270	35.91 bc	35.42 bc	43.87 cde	38.4 B
360	51.38 de	49.86 de	56.22 e	52.49 C
450	42.01 cd	55.5 e	53.14 de	50.22 C
Media Cv	33.20 a	36.19 ab	37.69 b	
C.V. (%):	26.9			
Probabilidad de F:	DMS			
Cv	0.0350*	3.88879		
DDS	<0.0001**	5.89775		
Cv x DDS	0.0244*	12.93083		
<b>Ciclo soca</b>				
	<b>Cv</b>			
DDS x Cv	MEX 69-290	CP 72-2086	MEX 79-431	Media DDC
180	19.83 a	20.43 a	22.18 a	20.81 A
270	33.53 b	31.58 b	29.37 b	31.50 B
360	40.33 c	38.07 c	39.83 c	39.41 C
Media Cv	30.03 a	31.23 a	30.46 a	
C.V. (%):	12.61			
Probabilidad de F:	DMS			
Cv	0.3273 NS	1.90773		
DDC	<0.0001**	1.90773		
Cv x DDC	0.0180**	4.3761		

†Medias con una letra en común no son significativamente diferentes ( $p \leq 0.05$ ). Letras minúsculas representan diferencias horizontalmente y mayúsculas verticalmente. DDS = días después de la siembra, DDC = días después de la cosecha, C.V. = Coeficiente de variación, NS= no significativo a  $p \leq 0.05$ , \*diferencia estadística significativa a  $p \leq 0.05$ , \*\*diferencia estadística significativa alta a  $p \leq 0.01$ , DMS = diferencia media significativa.

Durante el ciclo plantilla, en el muestreo realizado en la cosecha (450 DDS), el cultivar MEX 69-290 mostró un descenso en la variable MSTo, aunque este no fue significativo en comparación con los otros cultivares. Los valores de MSTo obtenidos fueron inferiores a los encontrados por De Oliveira *et al.* (2010) para 11 cultivares de caña de azúcar y para las 60 t ha<sup>-1</sup> de MSTo para el cultivar MEX 79-41 (Córdova-Gamas, 2016).

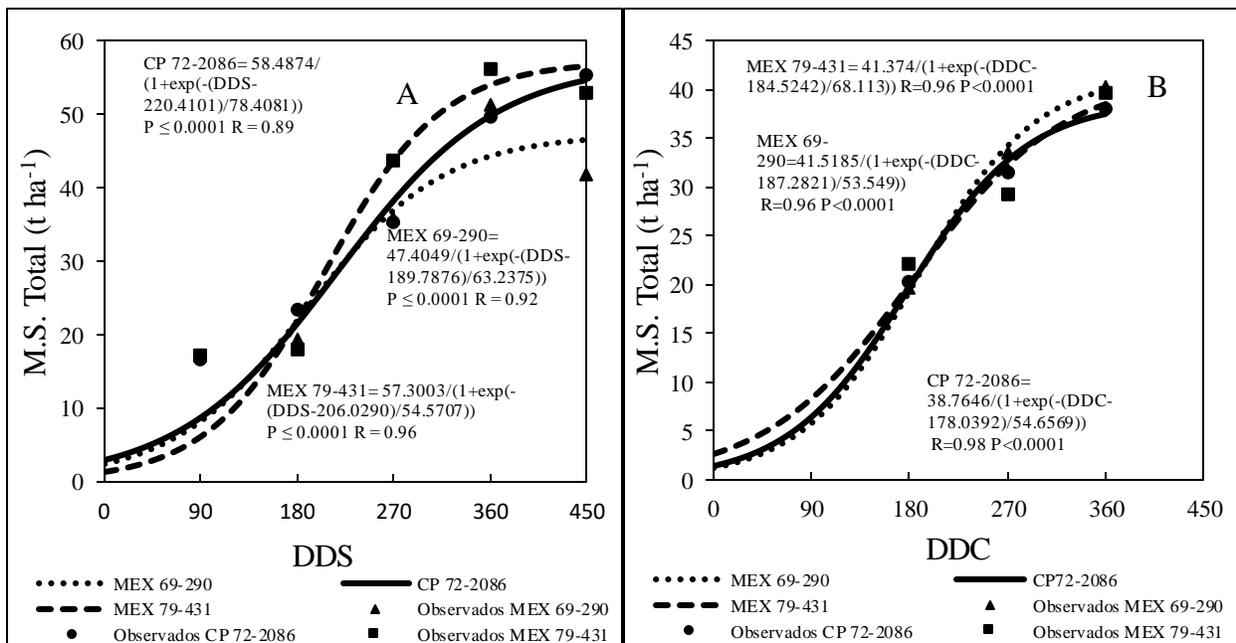


Figura 15. Línea de tendencia sigmoidea y dinámica de acumulación de materia seca total (t ha<sup>-1</sup>) de tres cultivares de caña de azúcar durante el ciclo plantilla (A) y soca (B) en el área de abastecimiento del Ingenio Santa Rosalía de la Chontalpa.

#### 5.4.5. Tasas de crecimiento e índice de cosecha

Las variables de tasas de crecimiento absoluto (TCA) y del cultivo (TCC) mostraron un comportamiento similar, observándose que tanto la TCA como TCC aumentaron conforme al ciclo de cultivo hasta los 210 DDS en el ciclo plantilla, donde alcanzan los valores mayores para estas tasas de crecimiento. Posteriormente, se observó que estos valores inician un descenso continuo hasta la cosecha (450 DDS). La TCA máxima alcanzada por los cultivares evaluados fue de 187, 192 y 262 kg ha<sup>-1</sup> día<sup>-1</sup> para MEX 69-290, CP 72-2086 y MEX 79-431, respectivamente. Mientras

que los valores menores oscilaron entre 31 kg ha<sup>-1</sup> día<sup>-1</sup> para CP 72-2086 y 12 kg ha<sup>-1</sup> día<sup>-1</sup> para MEX 69-290 y MEX 79-431 (Figura 16A) durante el ciclo plantilla, estos valores son similares a los 232 kg ha<sup>-1</sup> día<sup>-1</sup> descritos por De Oliveira *et al.* (2010) para 11 cultivares de caña de azúcar en Brasil.

Durante el ciclo soca, la TCA máxima alcanzada por los cultivares de caña de azúcar fue de 193, 177 y 151 kg ha<sup>-1</sup> día<sup>-1</sup> a los 180 DDC para MEX 69-290, CP 72-2086 y MEX 79-431 respectivamente, mientras que los valores más bajos oscilaron entre 24 kg ha<sup>-1</sup> día<sup>-1</sup> para CP 72-2086, 28.8 kg ha<sup>-1</sup> día<sup>-1</sup> para MEX 69-290 y 40.2 kg ha<sup>-1</sup> día<sup>-1</sup> para MEX 79-431 a 360 DDC (Figura 16B).

Por otro lado, los valores de TCC fueron bajos al inicio del cultivo, pero aumentaron rápidamente conforme aumentó la edad del cultivo, alcanzando valores máximos a los 210 DDS durante el ciclo plantilla, y 180 DDC en el ciclo soca, para posteriormente iniciar un descenso rápido, este comportamiento también fue descrito por Silva y Conti (2014) para el cultivar SP 80 1816. La TCC máxima por los cultivares de caña de azúcar varió de 18.7, 19.2 y 26.3 g m<sup>2</sup> día<sup>-1</sup> para MEX 69-290, CP 72-2086 y MEX 79-431, respectivamente. Mientras que los valores de TCC mínimos oscilaron entre 3.1 g m<sup>2</sup> día<sup>-1</sup> para CP 72-2086, 1.2 g m<sup>2</sup> día<sup>-1</sup> para MEX 69-290 y MEX 79-431, durante el ciclo plantilla (Figura 17A), dichos valores fueron similares a los reportados por Gava *et al.* (2001).

Durante el ciclo soca, la TCC máxima se observó a los 180 DDC y fue de 15.2, 17.7 y 19.3 g m<sup>2</sup> día<sup>-1</sup> para MEX 79-431, CP 72-2086 y MEX 69-290, respectivamente, mientras que los valores más bajos de TCC, fueron del orden de 2.4, 2.9 y 4.0 g m<sup>2</sup> día<sup>-1</sup> a los 360 DDC, para CP 72-2086, MEX 69-290 y MEX 79-431, respectivamente (Figura 17B).

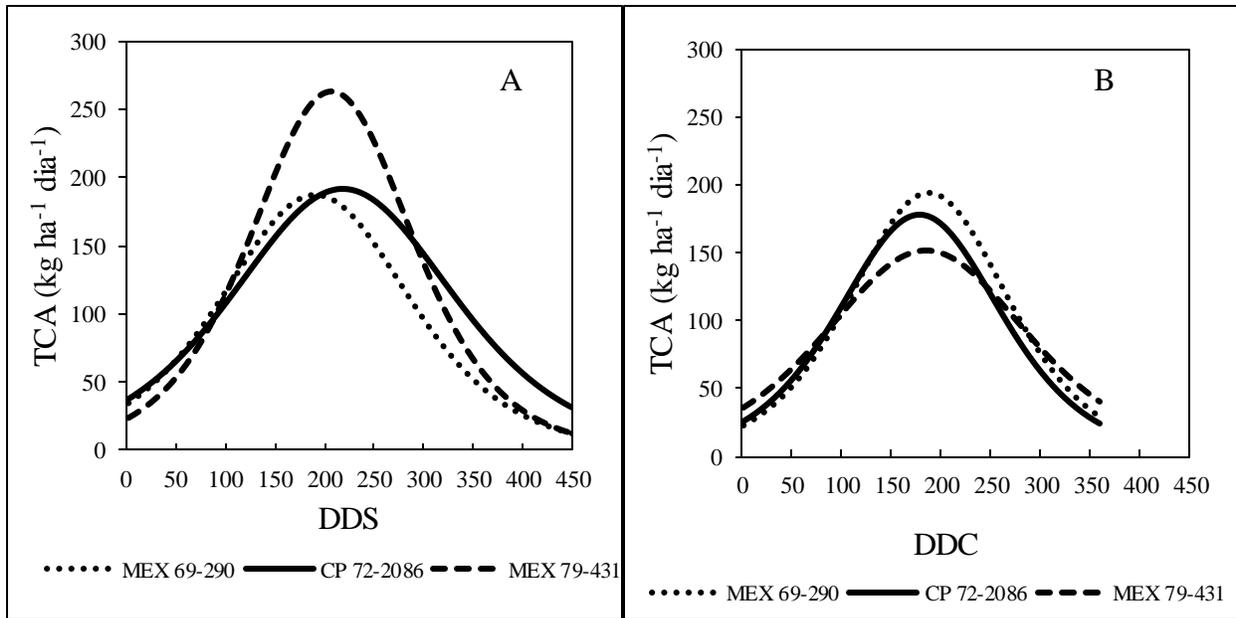


Figura 16. Tasa de crecimiento absoluto (TCA), de tres cultivares de caña de azúcar durante el ciclo plantilla (A) y soca (B) en el área de abastecimiento del Ingenio Santa Rosalía de la Chontalpa.

Asimismo, la tasa de crecimiento relativo (TCR) descendió conforme a la edad del cultivo, de acuerdo con Marafon (2012), esto ocurre por el auto-sombreado de las hojas. Los valores de TCR estimados para los cultivares de caña de azúcar fueron 0.018 a 0.0002, 0.015 a 0.0003 y 0.13 a 0.0006  $\text{g g}^{-1} \text{ día}^{-1}$ , respectivamente para MEX 79-431, MEX 69-290 y CP 72-2086, en el ciclo plantilla (Figura 18A) y de 0.013 a 0.001, 0.017 a 0.0006 y de 0.018 a 0.0007  $\text{g g}^{-1} \text{ día}^{-1}$ , durante el ciclo soca para MEX 79-431, CP 72-2086 y MEX 69-290, respectivamente (Figura 18B).

Según Marafon (2012) en los cultivares más productivos, que generalmente desarrollan más rápidamente, su índice de área foliar (IAF), los valores de TCR son mayores, y cuando la planta alcanza un IAF relativamente alto, la correlación entre TCR y productividad económica, disminuye.

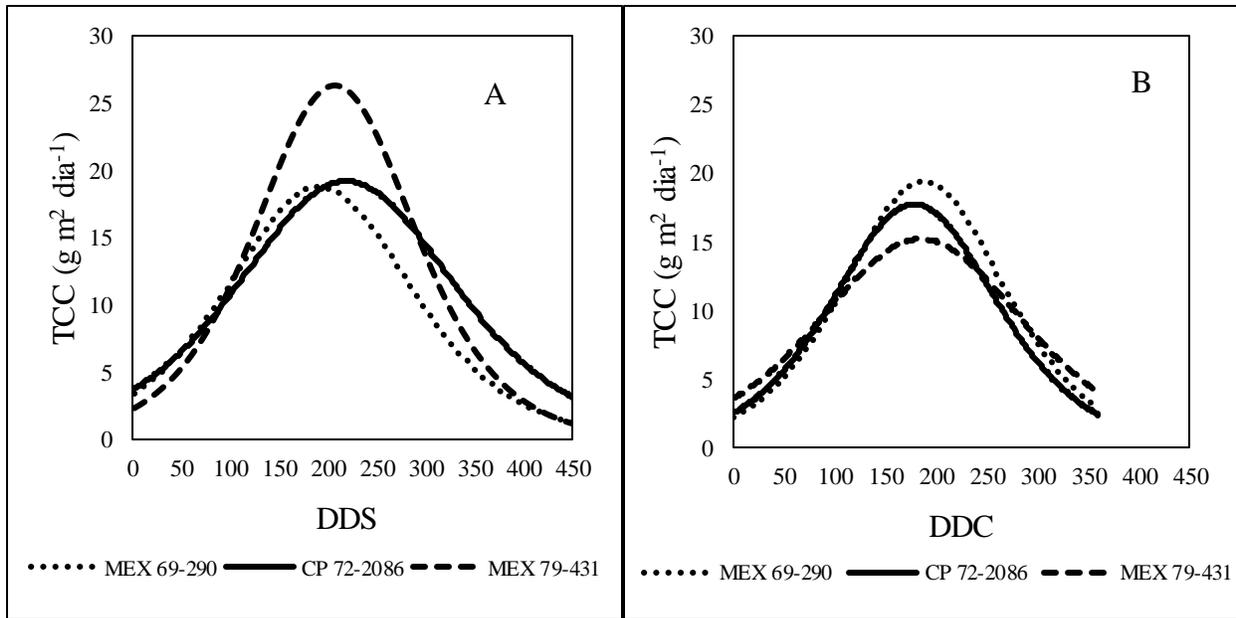


Figura 17. Tasa de crecimiento del cultivo (TCC), de tres cultivares de caña de azúcar durante el ciclo plantilla (A) y soca (B) en el área de abastecimiento del Ingenio Santa Rosalía de la Chontalpa.

También, el índice de cosecha (IC) de los cultivares de caña de azúcar aumentó conforme la edad del cultivo. En el ciclo plantilla a los 300 DDS, los cultivares CP 72-2086 y MEX 69-290 alcanzaron valores de IC del orden de 0.74 y 0.7, respectivamente. Sin embargo, el cultivar MEX 79-431, alcanzó, aproximadamente, el mayor IC a los 390 DDS y este valor se mantuvo hasta la cosecha (Figura 19A). Al final del ciclo plantilla, el IC fue de 0.69, 0.70 y 0.74 para MEX 69-290, CP72-2086 y MEX 79-431, respectivamente.

Durante el ciclo soca, el IC mayor se presentó a los 360 DDC con valores de 0.62, 0.69 y 0.70 para los cultivares CP 72-2086, MEX 79-431 y MEX 69-290, respectivamente (Figura 19B). Estos valores son muy similares con lo descrito por Xie *et al.* (2016), quienes reportan un IC de 0.70 para caña de azúcar.

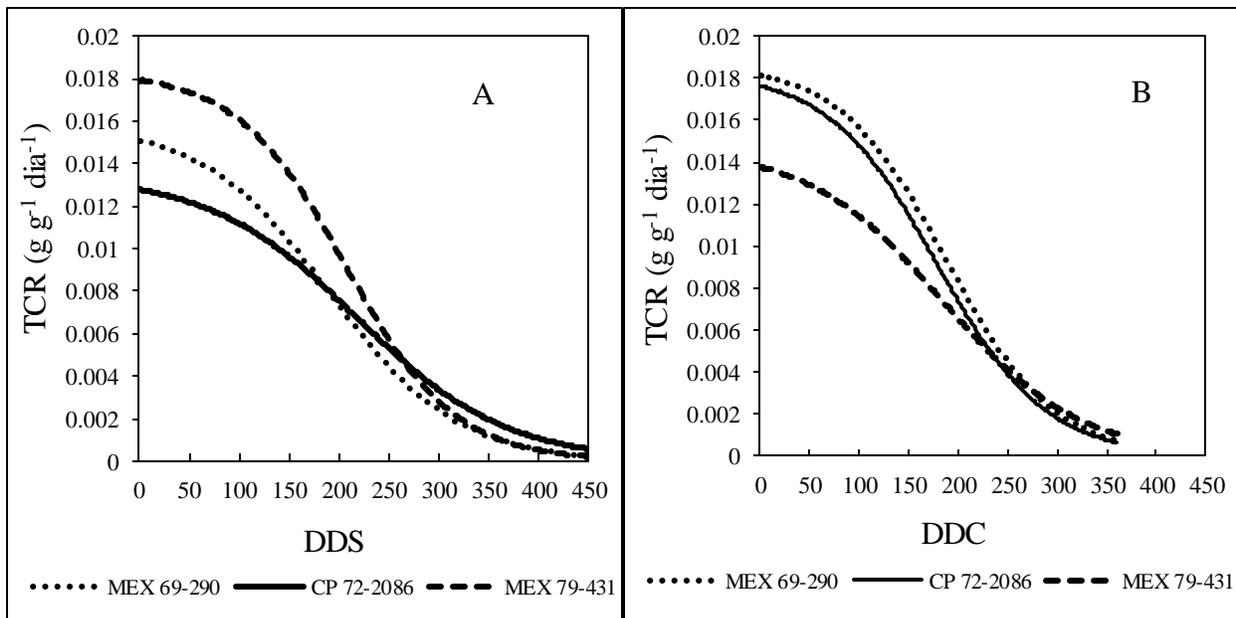


Figura 18. Tasa de crecimiento relativo (TCR), de tres cultivares de caña de azúcar durante el ciclo plantilla (A) y soca (B) en el área de abastecimiento del Ingenio Santa Rosalía de la Chontalpa.

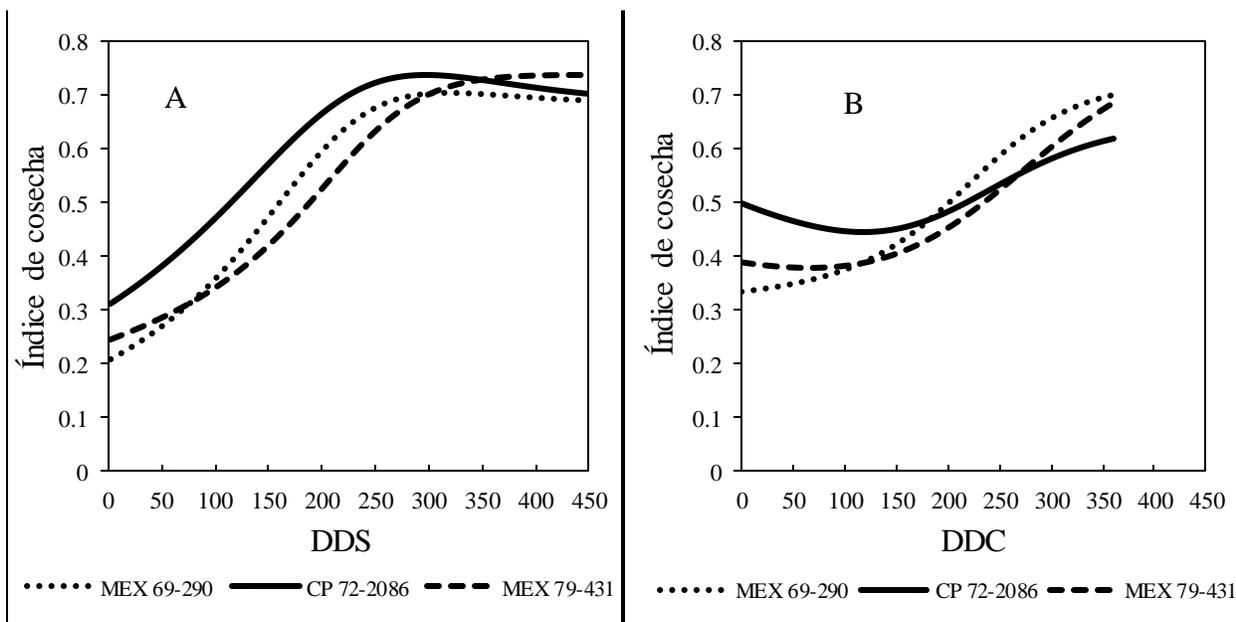


Figura 19. Índice de cosecha (IC) de tres cultivares de caña de azúcar durante el ciclo plantilla (A) y soca (B) en el área de abastecimiento del Ingenio Santa Rosalía de la Chontalpa.

## **5.5. Índices de vegetación**

### **5.5.1. Porcentaje de cobertura**

En relación a la variable de porcentaje de cobertura, se encontraron diferencia estadística significativa para los cultivares de caña (Cv), días después de la siembra (DDS). La interacción Cv x DDS fue significativa estadísticamente en el ciclo plantilla. El cultivar MEX 69-290 presentó el valor menor para esta variable (59.35%) y MEX 79-431 presentó el mayor valor (64.58%), este último sin diferencia estadística con CP 72-2086. Contrariamente, en el ciclo soca, el cultivar MEX 79-431 presentó la menor cobertura (49.55 %), mientras que el cultivar CP 72-2086 presentó el mayor valor para esta variable (61.16%). En lo referente a las fechas de muestreo, los valores para esta variable fueron estadísticamente diferentes en cada muestreo desde los 60 hasta los 180 DDS en el ciclo plantilla y desde los 30 hasta los 150 DDC en soca (Cuadro 14).

La interacción Cv x DDS durante el ciclo plantilla, indica que el porcentaje de cobertura presentó un incremento estadísticamente significativo entre los 60, 90 y 120 DDS y entre los 120 y 180 DDS para los tres cultivares de caña de azúcar; sin embargo, entre las últimas tres fechas de muestreo (150, 180 y 210 DDS), no se encontraron diferencias estadísticas significativas en esta variable.

El porcentaje de cobertura para los tres cultivares y los dos ciclos cultivo, presentó el mejor ajuste con una línea de tendencia sigmoidea (Figura 20), con alta correlación y alta significancia. Durante el ciclo soca, los cultivares evaluados registraron una disminución del porcentaje de cobertura correspondiente a 9.1, 11.2 y 23.3% para CP 72-2086, MEX 69-290 y MEX 79-431, respectivamente, con respecto al ciclo plantilla. Esta disminución se asocia con la reducción del número de tallos y el rendimiento de caña de los cultivares en el ciclo soca con respecto al ciclo plantilla.

Cuadro 14. Cobertura (%) de tres cultivares (Cv) de caña de azúcar, durante el ciclo plantilla y soca en el Ingenio Santa Rosalía de la Chontalpa.

<b>Ciclo plantilla</b>				
	<b>Cv</b>			
DDS x Cv	MEX 69-290	CP 72-2086	MEX 79-431	Media DDS†
60	12.96 a	20.98 a	15.64 a	16.52 A
90	40.03 b	43.28 b	47.43 bc	48.13 B
120	59.29 cd	68.39 cde	61.07 cde	58.37 C
150	70.94 defg	75.44 efgh	80.75 fghi	75.71 D
180	85.00 ghi	79.80 fghi	88.07 hi	84.29 E
210	87.87 hi	79.06 fghi	94.54 i	87.16 E
Media Cv	59.35 a	61.16 ab	64.58 b	
C.V. (%):	23.08			
Probabilidad de F:		DMS		
Cv	0.0113*	3.91809		
DDS	0.0001**	7.24789		
Cv x DDS	0.0001**	15.94827		
<b>Ciclo soca</b>				
	<b>Cv</b>			
DDC x Cv	MEX 69-290	CP 72-2086	MEX 79-431	Media DDC
30	22.36 a	20.07 a	17.77 a	20.07 A
60	38.45 b	38.69 b	33.86 b	37.00 B
90	52.19 cd	59.04 d	50.20 c	53.81 C
120	69.68 e	74.52 ef	67.76 e	70.65 D
150	80.86 fg	85.53 g	78.17 fg	81.52 E
Media Cv	52.71 b	55.57 c	49.55 a	
C.V. (%)	11.63			
Probabilidad de F:		DMS		
Cv	< 0.0001**	2.34456		
DDC	< 0.0001**	3.52401		
Cv x DDC	0.1615 NS	7.59371		

†Medias con una letra en común no son significativamente diferentes ( $p \leq 0.05$ ). Letras minúsculas representan diferencias horizontalmente y mayúsculas verticalmente. DDS = días después de la siembra, DDC = días después de la cosecha, C.V. = Coeficiente de variación, \*diferencia estadística significativa a  $p \leq 0.05$ , \*\*diferencia estadística significativa alta a  $p \leq 0.01$ , DMS = diferencia media significativa.

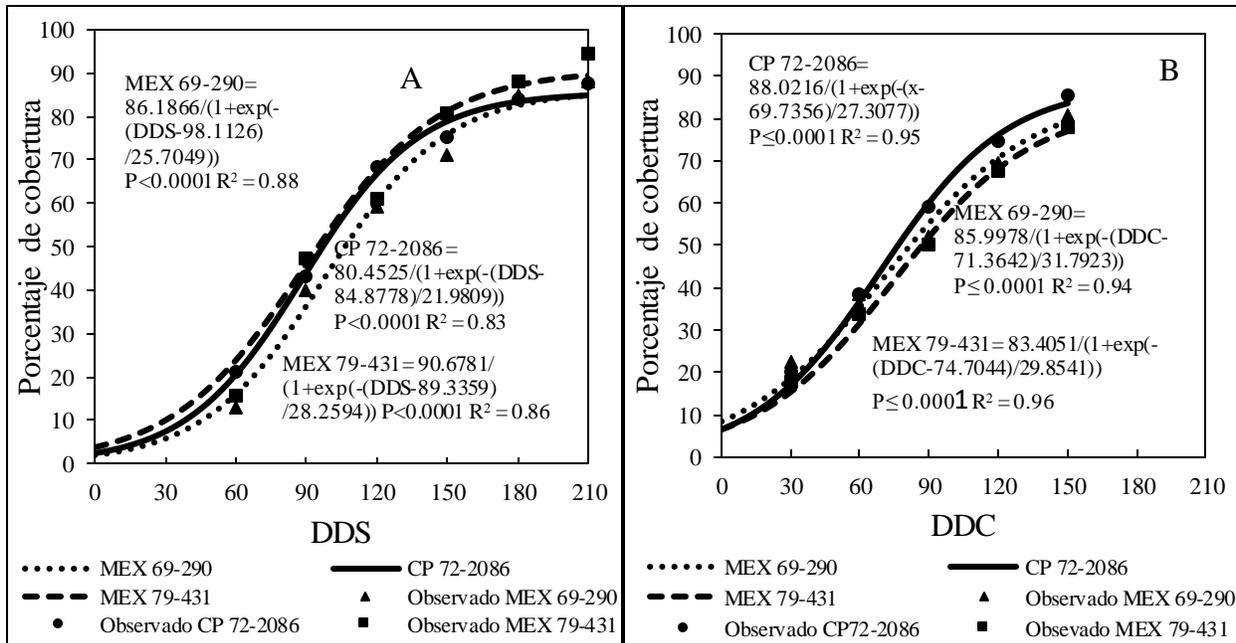


Figura 20. Línea de tendencia sigmoidea y dinámica del porcentaje de cobertura de tres cultivares de caña de azúcar durante el ciclo plantilla (A) y soca (B) en el área de abastecimiento del Ingenio Santa Rosalía de la Chontalpa.

### 5.5.2. Índice de área foliar (IAF)

En relación a la variable índice de área foliar (IAF) en el ciclo plantilla, durante los primeros seis muestreos, de los 150 a los 300 DDS hubo diferencia estadística significativa. A partir de los 300 DDS, el IAF se mantuvo estable hasta la cosecha (Cuadro 15). El IAF máximo observado fue de 6.4 (a los 360 DDS), 6.7 (a los 420 DDS) y 6.79 (a los 360 DDS) para MEX 69-290, MEX 79-431 y CP 72-2086, respectivamente, los cuales fueron similares a los valores máximos reportados por Begue *et al.* (2010), en la Isla Reunión, Francia, donde el rango de IAF fue de 0.1 a 7.0.

La dinámica de la variable de IAF mostró un crecimiento exponencial a partir del inicio de la medición y hasta los 360 DDS, después, se observó una ligera tendencia a disminuir. La línea de tendencia que presentó mejor ajuste para el IAF en los tres cultivares de caña de azúcar fue la polinomial cuadrática (Figura 21A). En este sentido, Abreu *et al.* (2013) encontraron una tendencia lineal para el IAF (calculado a través del área foliar), en tres de seis cultivares de caña de azúcar

Cuadro 15. Índice de área foliar de tres cultivares (Cv) de caña de azúcar durante el ciclo plantilla en el área de abastecimiento del Ingenio Santa Rosalía de la Chontalpa.

DDS x Cv	Cv			Media DDS†
	MEX 69-290	CP 72-2086	MEX 79-431	
150	2.03	1.74	1.72	1.83 A
180	2.48	2.66	2.21	2.45 A
210	4.29	4.03	4.06	4.13 B
240	4.70	4.74	4.68	4.71 BC
270	5.62	4.95	5.02	5.20 C
300	6.12	5.89	5.74	5.92 D
330	6.26	6.11	6.17	6.18 D
360	6.40	6.79	5.76	6.28 D
390	5.75	6.48	6.05	6.03 D
420	6.05	6.73	6.70	6.51 D
450	5.83	6.73	6.55	6.37 D
Media Cv	5.06	5.14	4.97	
C.V. (%):	17.78			
Probabilidad de F:		DMS		
Cv	0.2282NS	0.24111		
DDS	0.0001**	0.64395		
Cv x DDS	0.2365NS	1.32716		

†Medias con una letra en común no son significativamente diferentes ( $p \leq 0.05$ ). Letras minúsculas representan diferencias horizontalmente y mayúsculas verticalmente, DDS = días después de la siembra, DDC= días después de la cosecha, C.V. = Coeficiente de variación, NS= no significativo a  $p \leq 0.05$ , \*\*diferencia significativa alta a  $p \leq 0.01$ , DMS= diferencia media significativa.

en ciclo plantilla, aunque para el ciclo soca reportaron una tendencia lineal cuadrática, siendo esta última la que mejor se asemeja a la dinámica del IAF en el presente trabajo durante el ciclo plantilla. En el ciclo soca, la línea de tendencia que presentó mejor ajuste para el IAF fue la sigmoidea (Figura 21B).

Según Machado *et al.* (1985), el IAF que permite el máximo de fotosíntesis, no es aquel en que se obtiene una mayor producción de biomasa (productividad máxima), lo cual se debe, en un momento dado, a que el aumento del IAF puede provocar el auto-sombreado por las hojas, disminuyendo la eficiencia fotosintética de la planta. Esto puede explicar que, en el presente

trabajo durante el ciclo plantilla, aunque no se encontraron diferencias estadísticas significativas entre cultivares en cuanto al IAF, sí lo hubo para el rendimiento de tallos.

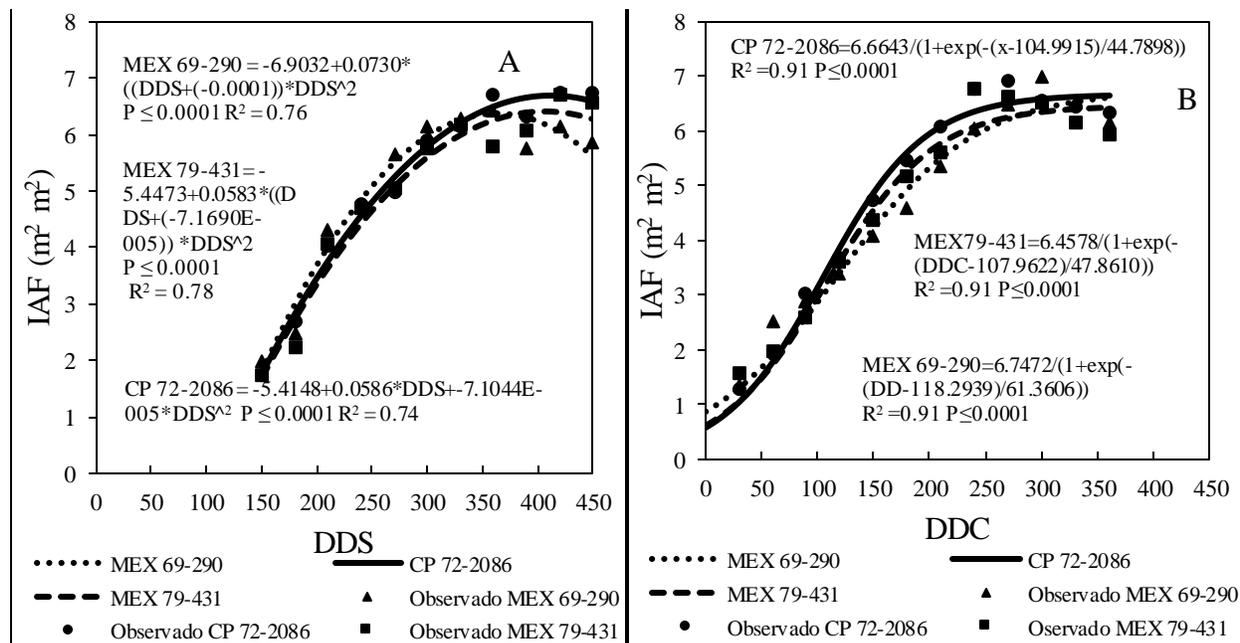


Figura 21. Línea de tendencia y dinámica del índice de área foliar (IAF) de tres cultivares de caña de azúcar durante el ciclo plantilla (A) y soca (B) en el área de abastecimiento del Ingenio Santa Rosalía de la Chontalpa.

Durante el ciclo plantilla, entre los 210 y los 240 DDS los cultivares mostraron un IAF entre 4.1 y 4.7, mientras que, durante el ciclo soca entre los 150 y los 180 DDC se observó un IAF promedio de 4.3 a 5.0 (Cuadro 16), lo cual concuerda con lo reportado por Machado *et al.* (1985), quienes mencionan que el IAF óptimo ocurre en las primeras fases del crecimiento, cuando el sombreado y el auto-sombreado son mínimos y que un IAF cercano de 4 es suficiente para que la caña de azúcar intercepte el 95% de la radiación solar incidente.

Durante el ciclo soca, se estimó diferencia estadística significativa entre cultivares (Cv), días después de la cosecha (DDC) y la interacción Cv x DDC. El cultivar CP 72-2086 alcanzó un IAF alto (4.93), mientras que entre MEX 69-290 y MEX 79-431, no hubo diferencia estadística significativa. En cuanto a las fechas de muestreo, el IAF aumentó conforme a la edad del cultivo, observándose el valor máximo a los 270 DDC (6.68), iniciando un ligero descenso a partir de esta

fecha (Cuadro 16). En cuanto a la interacción Cv x DDC, se observó que el valor de IAF fue de 6.76, 6.92 y 6.97 a los 240, 270 y 300 DDC para MEX 79-431, CP 72-2086 y MEX 69-290, respectivamente.

Cuadro 16. Índice de área foliar de tres cultivares (Cv) de caña de azúcar durante el ciclo soca en el área de abastecimiento del Ingenio Santa Rosalía de la Chontalpa.

DDC	Cv			Media DDC†
	MEX 69-290	CP 72-2086	MEX79-431	
30	1.36 a	1.29 a	1.54 a	1.40 A
60	2.49 bc	1.93 ab	1.94 ab	2.12 B
90	2.87 cd	3.03 cd	2.57 bc	2.82 C
120	3.37 cde	3.68 def	3.61 def	3.55 D
150	4.08 efg	4.74 ghij	4.35 fgh	4.39 E
180	4.58 ghi	5.46 ijklm	5.15 hijk	5.06 F
210	5.34 ijkl	6.05 mnop	5.59 jklmn	5.66 G
240	6.02 klmno	6.75 opq	6.76 opq	6.51 HI
270	6.48 opq	6.92 pq	6.63 opq	6.68 I
300	6.97 q	6.55 opq	6.49 opq	6.67 I
330	6.54 opq	6.44 nopq	6.14 mnopq	6.36 HI
360	6.14 lmnopq	6.31 mnopq	5.90 klmno	6.12 H
Media Cv	4.68 a	4.93 b	4.72 a	
C.V. (%):	13.11			
Probabilidad de F:		DMS		
Cv	0.0004**	0.15506		
DDC	< 0.0001**	0.43281		
Cv x DDC	< 0.0001**	0.88086		

†Medias con una letra en común no son significativamente diferentes ( $P \leq 0.05$ ). Letras minúsculas representan diferencias horizontalmente y mayúsculas verticalmente. DDC = días después de la cosecha, C.V. = Coeficiente de variación, \*\*diferencia estadística significativa alta a  $p \leq 0.01$ , DMS = diferencia media significativa.

### 5.5.3. Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI)

Para la variable índice diferencial de vegetación normalizada (NDVI, por sus siglas en inglés), se estimó diferencia estadística significativa para el efecto del cultivar de caña de azúcar (Cv), solamente durante el ciclo plantilla (DDS) y la interacción Cv x DDS (Cuadro 17). En el ciclo plantilla, el cultivar MEX 79-431 mostró el valor de NDVI mayor (0.69), aunque estadísticamente similar al cuantificado en el cultivar MEX 69-290. En las etapas de muestreo a los 60, 90 y 120 DDS, se observó un incremento estadísticamente significativo del NDVI (0.47, 0.61 y 0.67,

respectivamente). A partir de los 150 DDS (0.71) no se observó diferencia estadística significativa entre las fechas de muestreo hasta los 420 y 450 DDS (0.68). Los valores medios de NDVI obtenidos en el presente trabajo, fueron mayores a los obtenidos por Frasson *et al.* (2007), quienes reportaron valores de NDVI entre 0.27 y 0.43, 0.37 y 0.6 y entre 0.42 y 0.49 para 90, 120 y 150 DDS, respectivamente, para 28 cultivares de caña de azúcar, medidos con el sensor óptico Green Seeker, en la región de Assis, Sao Paulo, Brasil. Esto indica mayor biomasa fotosintéticamente activa y plantas con mayor vigor vegetativo (Brown y De Beurs, 2008) en los cultivares evaluados en este estudio.

Cuadro 17. Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) durante el ciclo plantilla de tres cultivares (Cv) de caña de azúcar en el área de abastecimiento del Ingenio Santa Rosalía de la Chontalpa.

DDS x Cv	Cv			Media DDS†
	MEX 69-290	CP 72-2086	MEX 79-431	
60	0.51 ab	0.48 ab	0.43 a	0.47 A
90	0.60 cd	0.56 bc	0.67 def	0.61 B
120	0.67 def	0.68 defg	0.66 def	0.67 C
150	0.71 efg	0.68 defg	0.74 fg	0.71 CD
180	0.73 fg	0.68 defg	0.77 g	0.73 D
210	0.74 fg	0.70 efg	0.73 fg	0.72 D
240	0.71 efg	0.72 efg	0.73 fg	0.72 D
270	0.73 fg	0.71 efg	0.73 fg	0.72 D
300	0.72 efg	0.72 efg	0.73 fg	0.72 D
330	0.72 efg	0.73 fg	0.74 fg	0.73 D
360	0.70 efg	0.70 efg	0.72 efg	0.71 CD
390	0.71 efg	0.69 efg	0.69 efg	0.69 CD
420	0.69 efg	0.69 efg	0.66 def	0.68 C
450	0.64 de	0.69 efg	0.70 efg	0.68 C
Media Cv	0.68 ab	0.67 a	0.69 b	
C.V. (%):	8.43			
Probabilidad de F:		DMS		
Cv	0.0008**	0.01258		
DDS	0.0001**	0.04073		
Cv x DDS	0.0001**	0.08281		

†Medias con una letra en común no son significativamente diferentes ( $p \leq 0.05$ ). Letras minúsculas representan diferencias horizontalmente y mayúsculas verticalmente. DDS = días después de la siembra, C.V. = Coeficiente de variación, \*\*diferencia estadística significativa alta a  $p \leq 0.01$ , DMS = diferencia media significativa.

En los cultivares de caña, la dinámica del NDVI se dividió en tres fases: 1) fase de rápido incremento hasta los 180 DDS en el ciclo plantilla y hasta los 150 DDC en el ciclo soca, siendo estas fechas de muestreo, en las cuales se alcanzó el valor NDVI mayor (entre 0.73 y 0.72 en el ciclo de plantilla y soca, respectivamente), 2) fase de estabilización, que comprende desde aproximadamente los 180 hasta los 390 DDS para el ciclo plantilla y de 150 a 270 DDC durante el ciclo soca y 3) fase de descenso del NDVI con valores de hasta 0.68 para el ciclo plantilla y 0.65 para el ciclo soca, similar a lo que describió Simões *et al.* (2005b) para el cultivar SP80-1842 durante la soca 4 y 5, en tres tipos de suelo.

Los valores más altos de NDVI durante el ciclo plantilla, fueron 0.74 para MEX 69-290 a 210 DDS, 0.73 para CP 72-2086 a 330 DDS y 0.77 para MEX 79-431 a 180 DDS. Estos valores son cercanos al NDVI mayor (0.7 para el sensor GreenSeeker y 0.68 para las imágenes satelitales) reportado por Rueda *et al.* (2015).

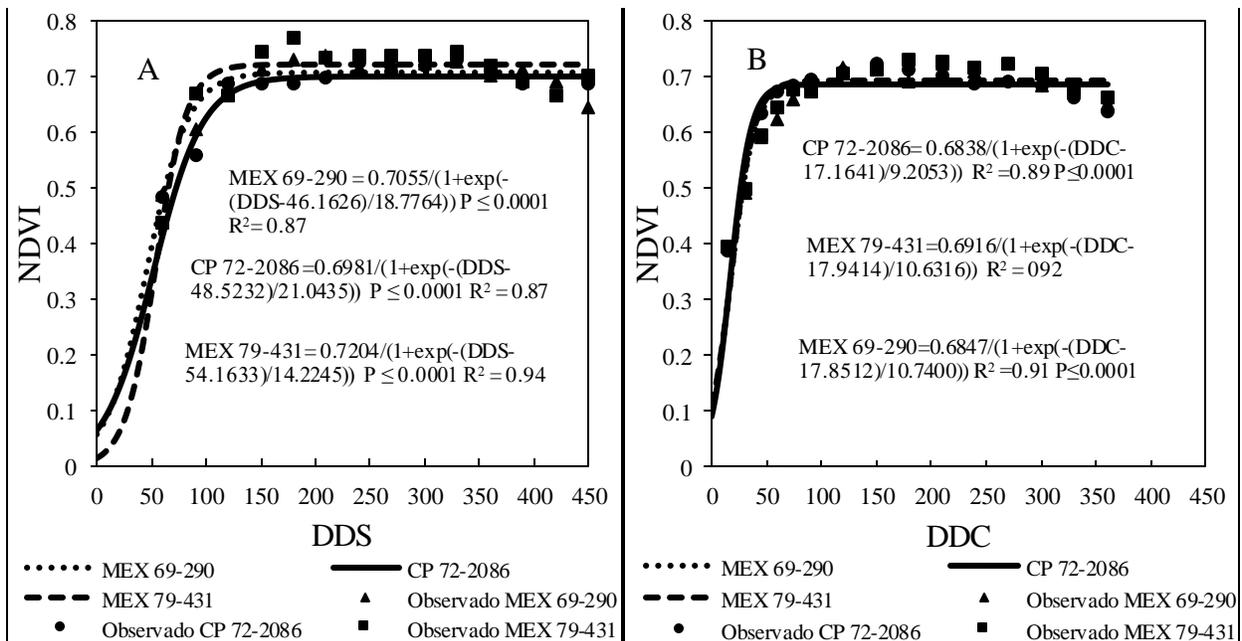


Figura 22. Línea de tendencia sigmoidea y dinámica del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) de tres cultivares de caña de azúcar durante el ciclo plantilla (A) y soca (B) en el área de abastecimiento del Ingenio Santa Rosalía de la Chontalpa.

Por otro lado, la línea de tendencia que mejor ajustó para la variable NDVI en los cultivares de caña (Cv) y las etapas de muestreo en los dos ciclos de cultivo (plantilla y soca) fue la sigmoidea (Figura 22). Durante el ciclo soca, los valores de NDVI mayores fueron 0.72 para MEX 69-290 y CP 72-2086 a los 150 DDC y 0.73 para MEX 79-431 a los 180 DDS (Cuadro 18).

Cuadro 18. Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) de tres cultivares (Cv) de caña de azúcar durante el ciclo soca en el área de abastecimiento del Ingenio Santa Rosalía de la Chontalpa.

DDC x Cv	Cv			Media DDC
	MEX 69-290	CP 72-2086	MEX79-431	
15	0.39 a	0.38 a	0.39 a	0.39 A
30	0.49 b	0.49 b	0.50 b	0.49 B
45	0.59 c	0.63 cdef	0.59 c	0.60 C
60	0.62 cd	0.67 defghijkl	0.64 cdefg	0.65 D
75	0.66 defghi	0.68 efghijkl	0.68 defghijkl	0.67 DE
90	0.68 defghijkl	0.69 ghijkl	0.67 defghijkl	0.68 EF
120	0.71 jkl	0.71 jkl	0.70 hijkl	0.71 GH
150	0.72 kl	0.72 kl	0.71 jkl	0.72 H
180	0.69 fghijkl	0.71 jkl	0.73 l	0.71 GH
210	0.72 kl	0.70 hijukl	0.73 l	0.72 GH
240	0.71 ijkl	0.69 ghijkl	0.71 jkl	0.70 FGH
270	0.72 kl	0.69 ghijkl	0.72 kl	0.71 GH
300	0.68 efghijkl	0.68 efghijkl	0.70 hijkl	0.69 EFG
330	0.68 efghijkl	0.66 defghij	0.67 defghijkl	0.67 DE
360	0.65 defgh	0.64 cdef	0.67 defghijkl	0.65 D
Media Cv	0.65	0.65	0.65	
C.V. (%):	5.86			
Probabilidad de F:		DMS		
Cv	0.1992 NS	0.00843		
DDC	< 0.0001**	0.02731		
Cv x DDC	0.0009**	0.05504		

†Medias con una letra en común no son significativamente diferentes ( $p \leq 0.05$ ). Letras minúsculas representan diferencias horizontalmente y mayúsculas verticalmente. DDC = días después de la cosecha, C.V. = Coeficiente de variación, NS= no significativo a  $p \leq 0.05$ , \*\*diferencia estadística significativa alta a  $p \leq 0.01$ , DMS = diferencia media significativa.

#### 5.5.4. Relación entre índices de vegetación y rendimiento de cultivares de caña de azúcar

##### Cultivar MEX 69-290

Durante el ciclo plantilla del cultivar MEX 69-290, el NDVI presentó buena correlación con materia seca de hojas (MSH) y rendimiento de tallos ( $r= 0.78$  y  $0.71$  respectivamente), mientras que la correlación fue positiva, pero moderada con la materia seca de tallos (MST) y materia seca total ( $r= 0.60$  y  $0.65$ , respectivamente), esto es similar a lo reportado por Jurecka *et al.* (2016), quienes encontraron una correlación que varió de  $0.61$  a  $0.72$  entre el NDVI del GreenSeeker y el rendimiento de caña de azúcar. Sin embargo, durante el ciclo soca la correlación entre el NDVI y el rendimiento fue baja. El IAF y el porcentaje de cobertura (CC), presentaron correlación directa y positiva con el rendimiento de tallos (Rto), MST, MSH y materia seca total (MSTo), durante los dos ciclos evaluados, con un  $r$  de  $0.90$  a  $0.99$  (Cuadro 19).

Cuadro 19. Coeficientes de correlación de Pearson ( $r$ ) y probabilidad entre índices de vegetación y rendimiento del cultivar de caña de azúcar MEX 69-290, durante los ciclos de cultivo de plantilla y de soca.

<b>Ciclo plantilla</b>							
	NDVI	IAF	CC	MST	MSH	MSTo	Rto
NDVI	1	**	**	**	**	**	**
IAF	0.88	1	**	**	**	**	**
CC	0.60	0.86	1	**	**	**	**
MST	0.60	0.87	0.99	1	**	**	**
MSH	0.78	0.97	0.95	0.96	1	**	**
MSTo	0.65	0.90	0.99	0.99	0.97	1	**
Rto	0.71	0.93	0.99	0.99	0.99	0.99	1
<b>Ciclo soca</b>							
	NDVI	IAF	CC	MST	MSH	MSTo	Rto
NDVI	1	**	**	**	**	**	**
IAF	0.58	1	**	**	**	**	**
CC	0.50	0.98	1	**	**	**	**
MST	0.38	0.92	0.98	1	**	**	**
MSH	0.55	0.99	0.97	0.91	1	**	**
MSTo	0.44	0.97	0.99	0.99	0.96	1	**
Rto	0.40	0.94	0.99	0.99	0.93	0.99	1

NDVI= Índice de vegetación de diferencia normalizada, IAF = Índice de área foliar, CC= Porcentaje de cobertura, MSH= materia seca de hojas, MST= materia seca de tallos, MSTo= materia seca total, Rto= rendimiento de tallos, \*\* = diferencia estadística significativa alta a  $p \leq 0.05$ .

## Cultivar CP 72-2086

Durante el ciclo plantilla del cultivar CP 72-2086, el NDVI presentó buena correlación con MSH y Rto ( $r= 0.71, 0.72$ , respectivamente), estos valores son inferiores a los reportados por Zenteno *et al.* (2017), quienes encontraron un  $r= 0.95$  entre valores de NDVI obtenidos a partir de imágenes del satélite Landsat 7ETM+ y el rendimiento de caña, aunque los valores de NDVI, presentados por estos investigadores fueron inferiores a los encontrados en el presente trabajo. En el ciclo soca la correlación entre el NDVI y el Rto fue baja ( $r= 0.40$ ). El IAF y el CC, presentaron correlación positiva directa con MST, MSH, MSTo y Rto (Cuadro 20) en los ciclos plantilla y soca, CC fue el índice de vegetación que más correlacionó con el rendimiento de tallos ( $r= 0.99$ ).

Cuadro 20. Coeficientes de correlación de Pearson ( $r$ ) y probabilidad entre índices de vegetación y rendimiento del cultivar de caña de azúcar CP 72-2086, durante los ciclos de cultivo de plantilla y de soca.

Ciclo plantilla							
	NDVI	IAF	CC	MST	MSH	MSTo	Rto
NDVI	1	**	**	**	**	**	**
IAF	0.86	1	**	**	**	**	**
CC	0.71	0.97	1	**	**	**	**
MST	0.65	0.94	0.99	1	**	**	**
MSH	0.71	0.96	0.99	0.99	1	**	**
MSTo	0.66	0.94	0.98	0.99	0.99	1	**
Rto	0.72	0.97	0.99	0.99	0.99	0.99	1
Ciclo soca							
	NDVI	IAF	CC	MST	MSH	MSTo	Rto
NDVI	1	**	**	**	**	**	**
IAF	0.58	1	**	**	**	**	**
CC	0.47	0.96	1	**	**	**	**
MST	0.39	0.90	0.99	1	**	**	**
MSH	0.49	0.97	0.99	0.97	1	**	**
MSTo	0.43	0.94	0.99	0.99	0.99	1	**
Rto	0.40	0.91	0.99	0.99	0.98	0.99	1

NDVI= Índice de vegetación de diferencia normalizada, IAF = Índice de área foliar, CC= Porcentaje de cobertura, MSH= materia seca de hojas, MST= materia seca de tallos, MSTo= materia seca total, Rto= rendimiento de tallos, \*\* = diferencia estadística significativa alta a  $p \leq 0.05$ .

## Cultivar MEX 79-431

Durante el ciclo plantilla del cultivar MEX 79-431, el NDVI presentó buena correlación con MST ( $r=0.78$ ) y moderada con MSH, MSTo y Rto ( $r= 0.54, 0.61$  y  $0.63$ , respectivamente). La correlación entre el NDVI y el rendimiento durante el ciclo soca fue baja ( $r= 0.39, 0.41$  y  $0.47$ , para MST, Rto y MSTo, respectivamente) esto coincide con lo reportado por Rosa *et al.* (2015), quienes no observaron relación entre el NDVI medido con el sensor GreenSeeker RT200 y el rendimiento de tallos en caña de azúcar. El IAF y el CC presentaron correlación directa y positiva con MST, MSH, MSTo y Rto durante los dos ciclos evaluados, nuevamente CC fue el índice de vegetación que más se correlacionó con el rendimiento de tallos, con  $r= 0.99$  (Cuadro 21).

Cuadro 21. Coeficientes de correlación de Pearson ( $r$ ) y probabilidad entre índices de vegetación y rendimiento del cultivar de caña de azúcar MEX 79-431, durante los ciclos de cultivo de plantilla y de soca.

Ciclo plantilla							
	NDVI	IAF	CC	MST	MSH	MSTo	Rto
NDVI	1	**	**	**	**	**	**
IAF	0.82	1	**	**	**	**	**
CC	0.64	0.96	1	**	**	**	**
MST	0.78	0.99	0.95	1	**	**	**
MSH	0.54	0.91	0.99	0.89	1	**	**
MSTo	0.61	0.95	0.99	0.93	0.99	1	**
Rto	0.63	0.96	0.99	0.95	0.99	0.99	1
Ciclo soca							
	NDVI	IAF	CC	MST	MSH	MSTo	Rto
NDVI	1	**	**	**	**	**	**
IAF	0.60	1	**	**	**	**	**
CC	0.48	0.95	1	**	**	**	**
MST	0.39	0.88	0.98	1	**	**	**
MSH	0.59	0.98	0.91	0.81	1	**	**
MSTo	0.47	0.95	0.99	0.98	0.91	1	**
Rto	0.41	0.90	0.99	0.99	0.85	0.99	1

NDVI= Índice de vegetación de diferencia normalizada, IAF = Índice de área foliar, CC= Porcentaje de cobertura, MSH= materia seca de hojas, MST= materia seca de tallos, MSTo= materia seca total, Rto= rendimiento de tallos, \*\* = diferencia estadística significativa alta ( $p \leq 0.05$ ).

## **5.6. Calidad industrial de cultivares de caña de azúcar en ciclo plantilla**

### **5.6.1. Grados Brix (°Brix)**

Durante el ciclo plantilla, no se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre cultivares de caña de azúcar (Cuadro 22) en °Brix, registrándose valores entre 15.23 y 15.85 °Brix, inferiores a los valores de 20.4 a 21.3 °Brix observados por Pereira *et al.* (2017) durante la cosecha de cuatro cultivares de caña de azúcar en Brasil. Los °Brix se incrementaron de 13.94 a los 330 hasta 17.28 a 450 los DDS, siendo este último valor, ligeramente inferior a 18 °Brix establecido como el mínimo valor óptimo en caña de azúcar según Salgado *et al.* (2003). En el cultivar CP 72-2086, se observó una ligera caída de °Brix en el muestreo a los 450 DDS (Figura 23), aunque este no fue significativo estadísticamente. Los valores mayores de °Brix se observaron en el muestreo realizado a los 450 DDS, alcanzando un promedio de 17.28 °Brix, similar a 17.15 y 17.86 °Brix reportados por Salgado *et al.* (2017) para CP 72-1210 y MEX 69-290 con suministro de 120 y 180 kg N ha<sup>-1</sup>, respectivamente. Pero inferiores a los 20.3 a 22.35 °Brix descritos por Clemente *et al.* (2018) para tres cultivares de caña de azúcar a los 402 DDS.

### **5.6.2. Pol (%)**

En relación a la variable Pol (%), no se estimó diferencia estadística entre los cultivares de caña de azúcar (Cuadro 22). El % Pol fluctuó entre 12.5 a 13.43, el cual se considera adecuado, para un jugo de caña con buena calidad (Salgado *et al.*, 2003). En cuanto a las fechas de muestreo, el mayor % Pol (14.92) se observó en el muestreo a los 450 DDS, siendo inferior a 18.53 a 19.75% descritos por Clemente *et al.* (2018) para los cultivares RB991536, RB011941 y RB92579 a los 402 DDS.

Sin embargo, en la interacción Cv x fechas de muestreo, el % Pol fue diferente entre los muestreos a los 330 y los 390 DDS para los cultivares MEX 69-290 y CP 72-2086, pero no se observó diferencia estadística entre los muestreos a los 390 y los 450 DDS para dichos cultivares

(Cuadro 22). En relación al cultivar MEX 79-431 se observó diferencia estadística entre las tres fechas de muestreo, mostrando el % Pol mayor en la cosecha, esto se puede explicar por el proceso de acumulación de sacarosa que ocurre durante la etapa de madurez de la caña de azúcar (Xiao *et al.*, 2017). Los valores de % Pol en los cultivares, en el muestreo realizado a 450 DDS fueron 13.98% para el cultivar CP 72-2086 y 15.62% para MEX 69-290 y MEX 79-431, los cuales fueron mayores al rango de 12.0 a 13.4% reportados por Islam *et al.* (2011) para seis clones de caña de azúcar.

Los °Brix y Pol (%) de CP 72-2086 presentaron un ligero descenso entre el muestreo a los 330 y 450 DDS, aunque este no fue estadísticamente significativo. La línea de tendencia que mejor se ajustó para dichas variables en el cultivar CP 72-2086 fue polinómica cuadrática (Figura 23), lo cual indicó el descenso en los valores para estas variables en dicho cultivar, mientras que para los cultivares MEX 69-290 y MEX 79-431, se ajustaron mejor con una línea de tendencia polinómica lineal, indicando que los valores para dichas variables aún no descendían. Al respecto, Rodríguez *et al.* (2015), evaluaron 38 cultivares de caña de azúcar introducidos en Cuba, y determinaron que la ecuación polinómica de segundo grado resultó con mejor ajuste para modelar la madurez de los cultivares de caña de azúcar durante el período de zafra.

### **5.6.3. Pureza (%)**

El cultivar MEX 79-431 presentó la pureza menor (81.80%) en comparación con los cultivares MEX 69-290 (85.25%) y CP 72-2086 (84.41%), entre los cuales no hubo diferencia estadísticamente significativa, estos valores son inferiores al rango de 87.45 a 88.45% encontrados por Clemente *et al.* (2018). En cuanto a las fechas de muestreo, entre los 330 y 390 DDS, no se apreció diferencia estadística significativa, pero sí para el muestreo a los 450 DDS, donde se observó el mayor porcentaje de pureza (Cuadro 22). Los valores observados para pureza oscilaron

entre 82.01 y 86.44% en las fechas de muestreo, los cuales fueron ligeramente inferiores a 85.5 a 87.5% observados por Xiao *et al.* (2017) en Guangxi, China.

Cuadro 22. Calidad de jugo de tres cultivares de caña de azúcar (Cv) durante el ciclo plantilla, en el área de abastecimiento de Ingenio Santa Rosalía de la Chontalpa.

Cv x DDS	DDS	Cv			Media DDS †
		MEX 69-290	CP 72-2086	MEX 79-431	
°Brix	330	14.21 abc	14.17 ab	13.44 a	13.94 A
	390	15.57 bcde	16.32 cdef	14.84 abcd	15.58 B
	450	17.77 f	16.64 def	17.42 ef	17.28 C
	<b>Media Cv</b>	15.23a	15.71a	15.85a	
Pol (%)	330	11.84 ab	12.01 ab	10.51 a	11.45 A
	390	12.82 cd	14.17 cd	11.83 ab	12.94 B
	450	15.62 d	13.98 bcd	15.62 d	14.92 C
	<b>Media Cv</b>	13.43b	13.39ab	12.5b	
Fibra (%)	330	11.99 ab	12.08 ab	11.42 a	11.83 A
	390	12.76 ab	12.99 b	11.83 ab	12.30 A B
	450	12.69 ab	11.48 a	12.73 ab	12.53 B
	<b>Media Cv</b>	12.48a	12.18a	11.99a	
Pureza (%)	330	83.24 abc	84.66 bc	78.13 a	82.01 A
	390	84.59 bc	84.57 bc	79.85 ab	83.0 A
	450	87.92 c	84.00 bc	87.41 c	86.44 B
	<b>Media Cv</b>	85.25b	84.41b	81.80a	
Humedad (%)	330	82.9 b	81.24 b	83.68 b	82.61 B
	390	74.47 a	75.38 a	76.73 a	75.53 A
	450	74.52 a	75.48 a	73.37 a	74.46 A
	<b>Media Cv</b>	77.29a	77.37a	77.93a	
Azúcares reductores (%)	330	0.76 b	0.63 ab	0.76 b	0.72 B
	390	0.60 ab	0.55 ab	0.59 ab	0.58 A
	450	0.47 a	0.57 ab	0.53 ab	0.52 A
	<b>Media Cv</b>	0.61 a	0.58 a	0.63 a	
<b>Probabilidad de F para:</b>					
	<b>Cv</b>	<b>DDS</b>	<b>Cv x DDS</b>	<b>C.V. (%)</b>	
°Brix	0.2424NS	0.0001**	0.1850NS	8.41	
Pol	0.0317*	0.0001**	0.0070*	10.24	
Fibra	0.1726NS	0.0176*	0.0099*	7.24	
Pureza	0.0016*	0.0001**	0.0027*	3.88	
Humedad	0.5263NS	0.0001**	0.0220*	2.65	
Azúcares reductores	0.6707NS	0.0006**	0.4227NS	26.66	

†Medias con una letra en común no son significativamente diferentes ( $p \leq 0.05$ ). Letras minúsculas representan diferencias horizontalmente y mayúsculas verticalmente. DDS = días después de la siembra, C.V. = Coeficiente de variación, NS = no significativo a  $p \leq 0.05$ , \*diferencia estadística significativa a  $p \leq 0.05$ , \*\*diferencia estadística significativa alta a  $p \leq 0.01$ .

La dinámica del % pureza de los cultivares de caña de azúcar en la etapa de madurez fue cambiante (Figura 23), expresando un aumento desde los 330 DDS hasta la cosecha en los cultivares MEX 69-290 (aunque sin diferencias estadísticamente significativas) y MEX 79-431.

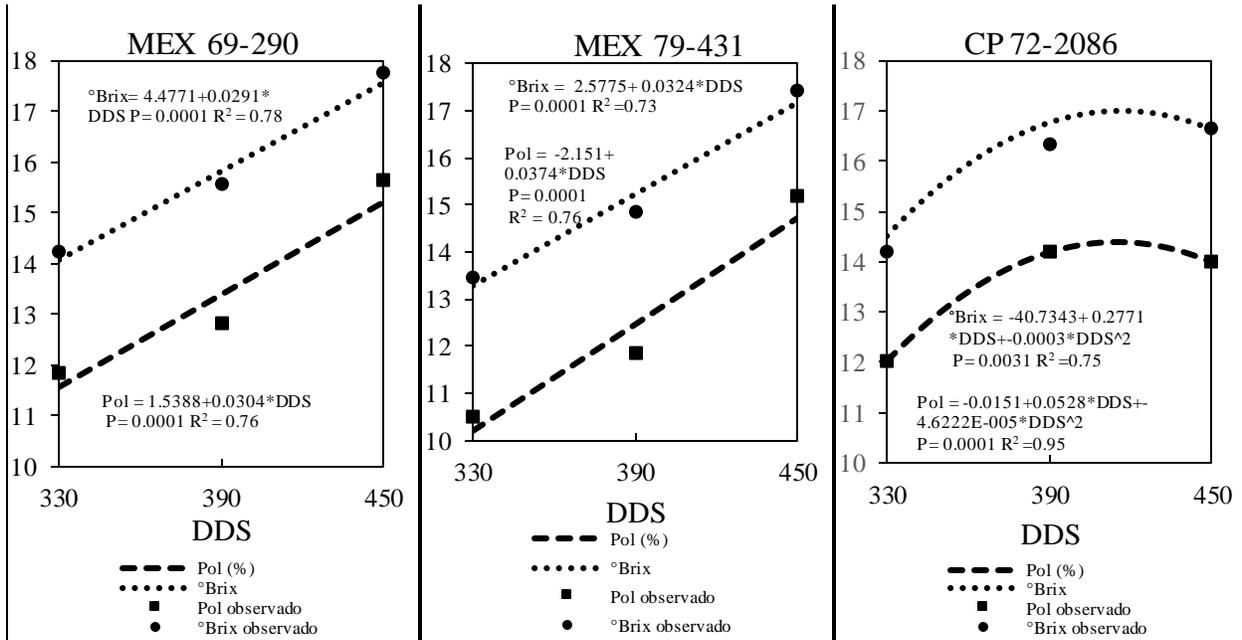


Figura 23. Dinámica de acumulación de °Brix y Pol (%) de los cultivares de caña de azúcar MEX 69-290, MEX 79-431 y CP 72-2086, durante el ciclo plantilla, en el área de abastecimiento de Ingenio Santa Rosalía de la Chontalpa.

La línea de tendencia que mostró mejor ajuste a los valores de pureza (%) fue una polinómica lineal, aunque esta no fue significativa para el cultivar CP 72-2086 (Figura 24A). Los valores de pureza (%) observados en el muestreo a los 450 DDS para los tres cultivares (84.00 a 87.92%) fueron ligeramente inferiores al rango de 85.9 a 89.3% reportado por Islam *et al.* (2011) para seis cultivares de caña de azúcar en Bangladés.

#### 5.6.4. Fibra (%)

La variable fibra (%) presentó diferencia estadística significativa por efecto de la fecha de muestreo y para la interacción Cv x DDS (Cuadro 22). Los valores registrados para los cultivares fueron entre 11.99 y 12.48%, los cuales fueron inferiores al rango de 13.2 a 13.5% reportados por

Clemente *et al.* (2018). En cuanto a la fecha de muestreo, el valor de fibra mayor (12.53%) se observó en el muestreo a los 450 DDS, aunque este no fue estadísticamente diferente al realizado a los 390 DDS (12.30%), mientras que el valor de fibra menor (11.83%), se observó en el muestreo a los 330 DDS, estos valores son menores al rango de 13.08 a 14.0% descrito por Salgado *et al.* (2017) para 10 cultivares de caña de azúcar fertilizados con 0, 120 y 180 kg N ha<sup>-1</sup>.

La variable fibra (%) para la interacción Cv x DDS, mostró que para el cultivar MEX 69-290 y MEX 79-431, la dinámica de acumulación de fibra fue similar. Se observa un aumento hacia la cosecha, aunque este incremento no fue estadísticamente significativo. En el caso del cultivar CP 72-2086, se observó una dinámica diferente, pues la fibra disminuyó significativamente del muestreo a los 390 en comparación a los 450 DDS. La curva que mejor se ajustó para los valores de fibra fue una polinómica cuadrática para los cultivares CP 72.2086 y MEX 69-290, mientras que para el cultivar MEX 79-431, se ajustó mejor una polinómica lineal (Figura 24B).

#### **5.6.5. Humedad (%)**

La variable humedad (%), no fue estadísticamente diferente entre cultivares, sin embargo, para el efecto de la fecha de muestreo y la interacción Cv x DDS, se observó diferencia estadísticamente significativa. La humedad fue muy similar entre los cultivares, con valores de 77.29 a 77.93%, los cuales fueron mayores a los reportados por Salgado-García *et al.* (2014b), quienes reportaron un porcentaje de humedad de 69.79 y 70.14 para los cultivares CP 72-2086 y MEX 69-290, respectivamente (Cuadro 22).

En cuanto a los muestreos, el realizado a los 330 DDS presentó r valor mayor de humedad (82.61%), disminuyendo en los muestreos posteriores, aunque sin diferencia estadística entre los 390 DDS (75.53%) y los 450 DDS (74.46%). La dinámica de humedad (%) en los cultivares de caña de azúcar mostró una tendencia a disminuir conforme a la cosecha, alcanzando valores entre

73.37 y 75.78% a los 450 DDS, los cuales, de acuerdo con Salgado *et al.* (2013), se consideran adecuados. La línea de tendencia que presentó mejor ajuste para los datos de humedad fue una polinómica inversa (Figura 25A).

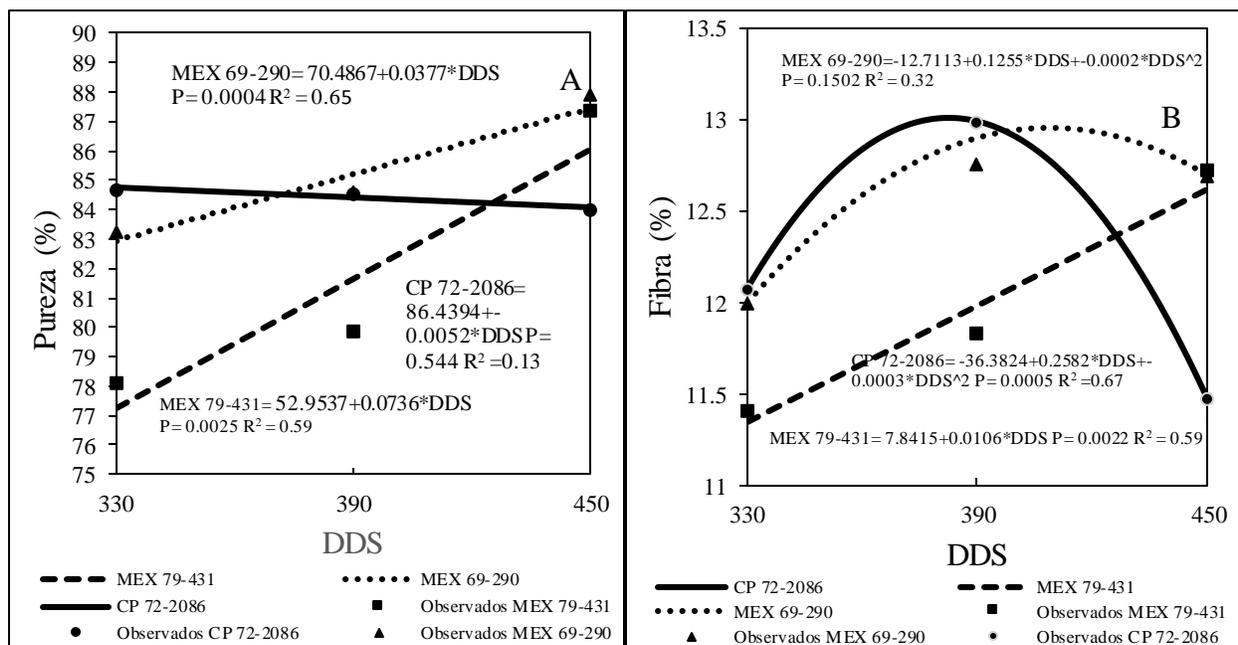


Figura 24. Dinámica del porcentaje de (A) pureza y (B) fibra de tres cultivares de caña de azúcar durante el ciclo plantilla en el área de abastecimiento del Ingenio Santa Rosalía de la Chontalpa.

### 5.6.6. Azúcares reductores (%)

En relación a la variable azúcares reductores, no se encontró diferencia estadísticamente significativa entre los cultivares de caña. Con respecto a la fecha de muestreo, se observó que los azúcares reductores disminuyeron conforme a la cosecha, siendo que a los 390 y 450 DDS, se registró el valor de azúcares reductores menor (0.58 y 0.52%, respectivamente), en los cultivares (Cuadro 22), mientras que a los 330 DDS se observó el valor de azúcares reductores mayor (0.72%).

Asimismo, se puede observar que los valores de azúcares reductores (%) fueron bajos cuando la caña de azúcar llegó madurez y altos cuando estuvo inmadura (Figura 25B). Estos resultados

fueron similares a los reportados por Xiao *et al.* (2017), quienes mencionaron que, durante el período de crecimiento y madurez de la caña de azúcar, después de que la sacarosa producida por las hojas se transporta a los tallos, la proporción de crecimiento en forma de azúcar reductor disminuye gradualmente y que la reducción de azúcar aumenta significativamente cuando la caña está demasiado madura, especialmente cuando la calidad del jugo tiende a disminuir.

Aunque los valores de azúcares reductores no fueron diferentes estadísticamente, para el cultivar CP72-2086 se observó un ligero aumento de azúcares reductores en el muestreo a los 450 DDS, lo que indicó que este cultivar en ciclo planta se debe cosechar poco después de los 330 DDS y antes de los 450 DDS, esto demostró que este es un cultivar de madurez temprana. Los cultivares MEX 69-290 y MEX 79-431 mostraron un comportamiento de madurez media-tardía. La línea de tendencia que presentó mejor ajuste para los datos de azúcares reductores fue una polinómica inversa (Figura 25B).

Asimismo, se observó que el comportamiento de °Brix y de Pol de los cultivares de caña de azúcar fue similar (Figura 23), es decir, conforme aumentaron o disminuyeron los °Brix, aumentó o disminuyó también el Pol y viceversa, lo cual se puede ratificar por la fuerte correlación positiva presentada entre estas variables,  $r = 0.99^{**}$  (Cuadro 23). La variable °Brix presentó correlación fuerte y negativa con los valores de humedad y azúcares reductores ( $r = -0.91^{**}$  y  $r = -0.95^{**}$  respectivamente), lo cual indicó que a valores altos de °Brix corresponden valores bajos de humedad y azúcares reductores.

Por otra parte, el porcentaje de humedad se correlacionó fuerte y positivamente con el porcentaje de azúcares reductores ( $r = 0.91^{**}$ ), al respecto, Salgado *et al.* (2016) observaron que a menor humedad en el tallo menos azúcares reductores.

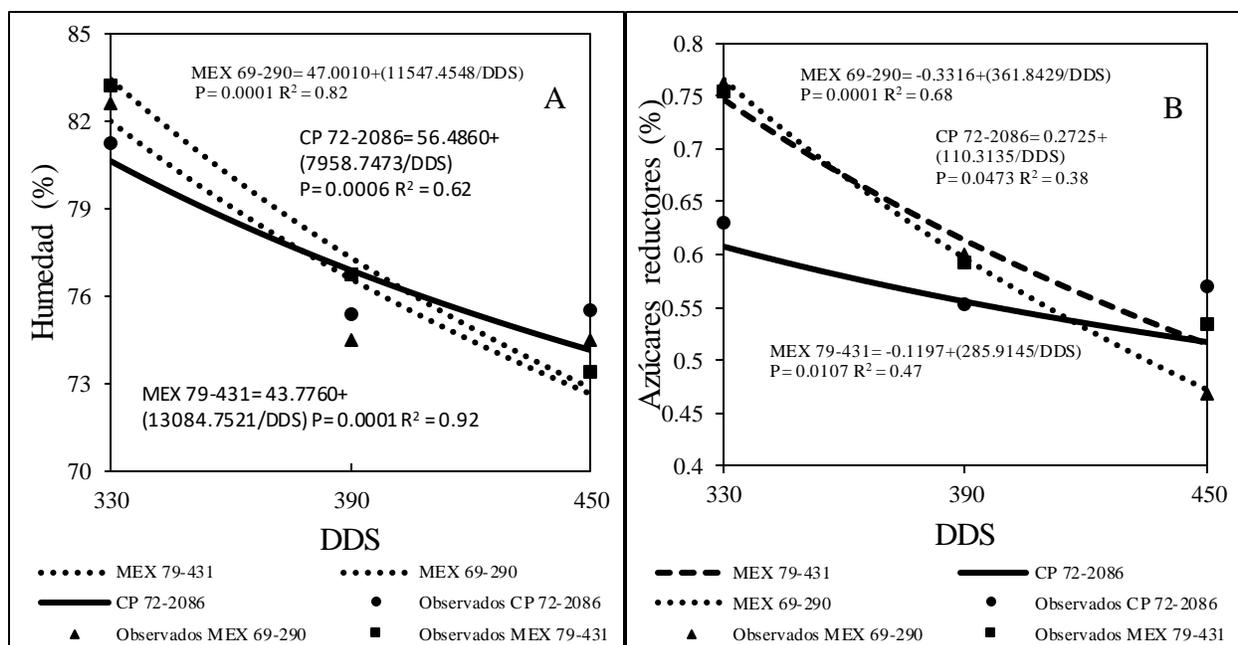


Figura 25. Dinámica del porcentaje de humedad (A) y azúcares reductores (B) de tres cultivares de caña de azúcar durante el ciclo plantilla en el área de abastecimiento del Ingenio Santa Rosalía de la Chontalpa.

Cuadro 23. Coeficientes de correlación de Pearson y probabilidades, entre variables de la calidad de jugo de tres cultivares de caña de azúcar durante el ciclo plantilla en el área de abastecimiento del Ingenio Santa Rosalía de la Chontalpa.

	°Brix	Humedad (%)	AR (%)	Fibra (%)	Pureza (%)	Pol (%)
°Brix	1	**	**	**	**	**
Humedad (%)	-0.91	1	**	**	**	**
AR(%)	-0.95	0.91	1	**	**	**
Fibra (%)	0.66	-0.47	-0.54	1	**	**
Pureza (%)	0.79	-0.71	-0.73	0.84	1	**
Pol (%)	0.99	-0.91	-0.94	0.71	0.86	1

AR = azúcares reductores, \*\*diferencia estadística significativa a  $p \leq 0.05$ .

## 5.7. Calidad industrial de cultivares de caña de azúcar en ciclo soca

### 5.7.1. Grados Brix

En relación a la variable °Brix en el ciclo de soca, se encontraron diferencias estadísticamente significativas para el efecto cultivar (Cv), días después de la cosecha (DDC) y para la interacción entre Cv x DDC. El cultivar CP 72-2086 alcanzó el valor mayor de °Brix (16.09), mientras que entre los cultivares MEX 69-290 y MEX 79-431 no presentaron diferencia estadísticamente

significativa, con valores de 14.36 y 13.94 °Brix (Cuadro 24), valores inferiores a los 19.08° reportados por Neto *et al.* (2006) para el cultivar SP79-1011, bajo diferentes láminas de riego.

Cuadro 24. Calidad industrial de tres cultivares de caña de azúcar en el ciclo soca en el área de abastecimiento del Ingenio Santa Rosalía de la Chontalpa.

Cv x DDC	Cv	DDC						Media Cv
		210	240	270	300	330	360	
°Brix	MEX 69-290	9.83 a	12.76 abcd	14.95 bcde	15.15 cd	16.71 e	16.75 e	14.36 A
	MEX 79-431	11.47 ab	12.04 abc	14.05 bcde	15.17 cde	15.91 de	14.76 bcde	13.94 A
	CP 72-2086	14.95 bcde	15.60 de	15.86 de	16.53 e	17.22 e	16.40 e	16.09 B
	Media DDC	12.17a	13.47 ab	14.95 bc	15.61 cd	15.97 cd	16.62 d	
Pol (%)	MEX 69-290	6.70 a	9.28 abc	12.39 cde	12.41 cde	14.93 e	14.79 e	11.75 A
	MEX 79-431	8.41 ab	10.42 bcd	11.18 bcde	13.00 de	14.06 e	13.65 de	11.89 A
	CP 72-2086	10.18 abcd	12.11 cde	12.67 cde	12.91 cde	15.29 e	14.25 e	12.90 B
	Media DDC	8.43 a	10.61 b	12.29 c	12.77 cd	14.76 e	14.23 de	
Pureza (%)	MEX 69-290	67.70 a	77.22 abc	82.76 bc	85.60 bc	89.32 c	88.26 c	81.81 A
	MEX 79-431	75.25 ab	79.52 abc	83.79 bc	85.67 bc	88.33 c	87.97 c	83.42 AB
	CP 72-2086	77.94 abc	85.20 bc	84.97 bc	88.37 c	88.57 c	87.71 c	85.46 B
	Media DDC	73.63 a	80.65 b	83.84 bc	86.55 c	87.98 c	88.74 c	
Fibra (%)	MEX 69-290	11.18 ab	11.38 abc	12.43 abcd	12.02 abcd	12.56 abcd	12.46 abcd	12.01 A
	MEX 79-431	10.98 a	12.13 abcd	12.58 abcd	13.21 bcd	13.05 bcd	12.72 abcd	12.44 A
	CP 72-2086	10.97 a	13.16 bcd	13.39 cd	13.56 cd	13.53 d	13.29 cd	12.98 B
	Media DDC	11.04 a	12.22 b	12.8 b	12.93 b	13.05 b	12.82 b	
Humedad (%)	MEX 69-290	80.67 d	76.57 bcd	73.87 ab	73.33 ab	71.53 a	71.25 a	74.54 B
	MEX 79-431	78.85 cd	75.43 abc	74.52 abc	74.30 abc	71.83 ab	71.63 a	74.43 B
	CP 72-2086	74.50 abc	74.27 abc	73.43 ab	71.43 a	71.20 a	70.97 a	72.63 A
	Media DDC	78.01 d	75.42 c	73.94 bc	73.02 ab	71.52 a	71.28 a	
AR (%)	MEX 69-290	1.13 d	0.95 cd	0.74 abc	0.69 abc	0.52 a	0.51 a	0.76 B
	MEX 79-431	0.85 abcd	0.75 abc	0.69 abc	0.62 abc	0.54 a	0.57 a	0.67 AB
	CP 72-2086	0.92 bcd	0.68 abc	0.59 ab	0.56 a	0.55 a	0.53 a	0.64 A
	Media DDC	0.96 c	0.79 b	0.68 ab	0.62 a	0.54 a	0.54 a	
Probabilidad de F:								
	°Brix	Pol (%)	Pureza (%)	Fibra (%)	Humedad(%)	AR (%)		
Cv	<0.0001**	0.0158**	0.0399*	0.0005**	0.0015**	0.0076**		
DDC	<0.0001**	<0.0001**	<0.0001**	<0.0001**	<0.0001**	<0.0001**		
Cv x DDC	0.0161**	0.1830 NS	0.4824 NS	0.5274 NS	0.1684 NS	0.2199 NS		
C.V (%)	8.1	10.56	5.24	5.93	2.34	18.02		

†Medias con una letra en común no son significativamente diferentes ( $p \leq 0.05$ ). Letras minúsculas representan diferencias horizontalmente y mayúsculas verticalmente. AR = azúcares reductores, DDC= días después de la cosecha, C.V. = Coeficiente de variación, NS = no significativo a  $p \leq 0.05$ , \*diferencia estadística significativa a  $p \leq 0.05$ , \*\*diferencia estadística significativa alta a  $p \leq 0.01$ .

En cuanto a las fechas de muestreo, los °Brix aumentaron conforme la edad de los cultivares, observándose el mayor valor (16.62 °Brix) a 360 DDC, aunque este no fue estadísticamente diferente del observado a los 300 DDC (15.61 °Brix) y los 330 DDC (15.97 °Brix). La línea de tendencia que mejor se ajustó a los datos de °Brix durante el ciclo soca, fue la sigmoidea (Figura 26A).

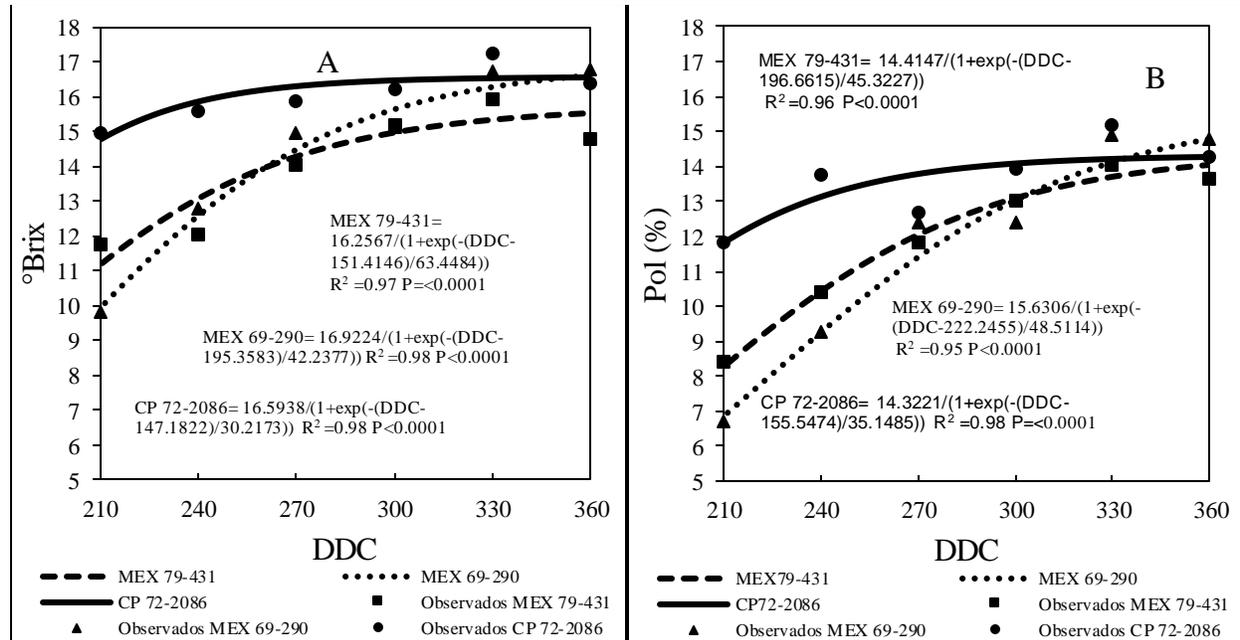


Figura 26. Dinámica de °Brix (A) y porcentaje de pol (B) de tres cultivares de caña de azúcar durante el ciclo soca en el área de abastecimiento del Ingenio Santa Rosalía de la Chontalpa.

### 5.7.2. Pol (%)

En relación a la variable Pol (%), esta mostró diferencia estadísticamente significativa para el efecto cultivares de caña de azúcar (Cv) y etapa de muestreo (DDC). El cultivar CP 72-2086 que alcanzó el valor mayor (12.90%), ligeramente superior a 12.10% al documentado por Salgado-García *et al.* (2016) para este cultivar en el área de abastecimiento del Ingenio Huixtla, Chiapas.

Entre los cultivares MEX 69-290 y MEX 79-431, no hubo diferencia estadísticamente significativa, 11.75 y 11.89% (Cuadro 24), siendo estos valores ligeramente inferiores al 12.67%

reportado por Salgado-García *et al.* (2016) para el cultivar MEX 69-290 durante el ciclo soca en el área de abastecimiento del Ingenio Pujilic.

El Pol aumentó conforme aumentó la edad del cultivo, encontrándose los valores de Pol promedio más altos para esta variable a los 330 DDC (14.76%), mostrando un ligero descenso a los 360 DDC, aunque sin diferencia estadísticamente significativa (Cuadro 24). La línea de tendencia que mejor se ajustó a los datos de Pol durante el ciclo soca fue la sigmoidea (Figura 26B).

### **5.7.3. Humedad (%)**

El ANAVA para el porcentaje de humedad durante el ciclo soca, mostró diferencia estadísticamente significativa para el efecto Cv y DDC. CP 72-2086 fue el cultivar que alcanzó el valor promedio más bajo con 72.66 %, mientras que entre MEX 69-290 y MEX 79-431, no hubo diferencia estadísticamente significativa, con porcentajes de 74.54 y 74.43%, respectivamente (Cuadro 24).

En cuanto a las fechas de muestreo, el porcentaje de humedad de los cultivares evaluados disminuyó conforme la edad del cultivo, observándose el menor valor (71.28%) a 360 DDC, aunque este no fue estadísticamente diferente del observado a 300 (73.02%) y 330 (71.52%) DDC, dichos valores indican que los cultivares evaluados se encuentra cercanos a su madurez. Al respecto, Salgado-García *et al.* (2016) menciona que lo ideal es tener humedades de 68 a 70% el cual es indicativo de la madurez de los tallos de caña de azúcar. La línea de tendencia que mejor se ajustó a los datos del porcentaje de humedad en tallos durante el ciclo soca, fue la de pico Gaussiano (Figura 27A).

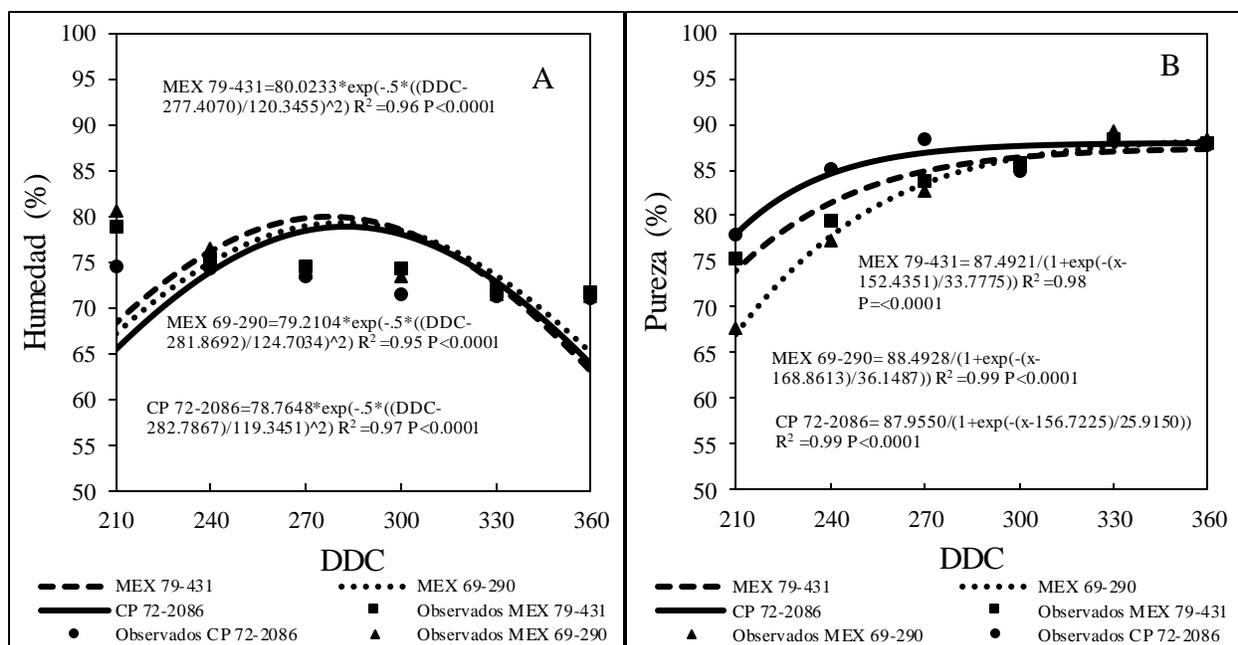


Figura 27. Dinámica del porcentaje de humedad (A) y pureza (B) de tres cultivares de caña de azúcar durante el ciclo soca en el área de abastecimiento del Ingenio Santa Rosalía de la Chontalpa.

#### 5.7.4. Pureza (%)

Respecto a la variable pureza (%) durante el ciclo soca, esta mostró diferencia estadísticamente significativa para el efecto de cultivares (Cv) y etapa de muestreo (DDC). El cultivar CP 72-2086 alcanzó el valor promedio de pureza mayor con 85.46%, mientras que el cultivar MEX 69-290 presentó el valor de pureza menor con 81.81%. En cuanto a las fechas de muestreo, de pureza de los cultivares aumentó conforme la edad del cultivo, observándose el valor de pureza mayor (88.74%) a los 360 DDC, aunque este no fue estadísticamente diferente al observado a 270 (83.84%), 300 (86.55%) y 330 (87.98%) DDC (Cuadro 24).

Los valores de pureza observados durante el ciclo soca en el presente estudio, son menores al rango de 88.2 a 92.4 % descrito por Neto *et al.* (2006) para el cultivar SP79-1011, bajo diferentes láminas de riego. La línea de tendencia que mejor se ajustó a los datos del porcentaje de pureza durante el ciclo soca, fue la sigmoidea (Figura 27B).

### **5.7.5. Fibra (%)**

El ANAVA para el porcentaje de fibra durante el ciclo soca, mostró diferencia estadísticamente significativa para el efecto Cv y DDC. CP 72-2086 fue el cultivar que alcanzó el valor promedio más alto con 12.98%, mientras que los valores para MEX 69-290 y MEX 79-431 fueron iguales estadísticamente. En cuanto a las fechas de muestreo, solo se observó diferencia entre el muestreo realizado a 210 DDC, fecha en la que se observó el menor porcentaje de fibra de los cultivares evaluados (Cuadro 24). A partir de los 240 DDC y hasta la cosecha (360 DDC) los valores de fibra (%) fueron similares, con valores entre 12.22 y 13.05%, ligeramente inferiores al rango entre 12.18 y 14.0% reportados por Neto *et al.* (2006) para el cultivar SP79-1011, bajo diferentes láminas de riego en Brasil. La línea de tendencia que mejor se ajustó a los datos del porcentaje de fibra en tallos durante el ciclo soca, fue la sigmoidea (Figura 28A).

### **5.7.6. Azúcares reductores (%)**

El ANAVA para el porcentaje de azúcares reductores durante el ciclo soca, mostró diferencia estadísticamente significativa para el efecto Cv y DDC. CP 72-2086 fue el cultivar que alcanzó el valor promedio más bajo con 0.64%, y MEX 69-290 el más alto con 0.76% (Cuadro 24). En cuanto a las fechas de muestreo, el porcentaje de azúcares reductores de los cultivares evaluados disminuyó conforme la edad del cultivo, observándose el menor valor (0.54%) entre 330 y 360 DDC, aunque este no fue estadísticamente diferente del observado a 270 (0.68%) y 300 (0.62%) DDC, estos valores son mayores a 0.29% descrito por Salgado-García *et al.* (2016) para el área de abastecimiento del Ingenio Huixtla Chiapas durante la zafra 2011/2012 y para los cultivares CP 72-2086 (0.26%) y Co 997 (0.43%). La línea de tendencia que mejor se ajustó a los datos del porcentaje de azúcares reductores durante el ciclo soca, fue la de pico Gaussiano (Figura 28B).

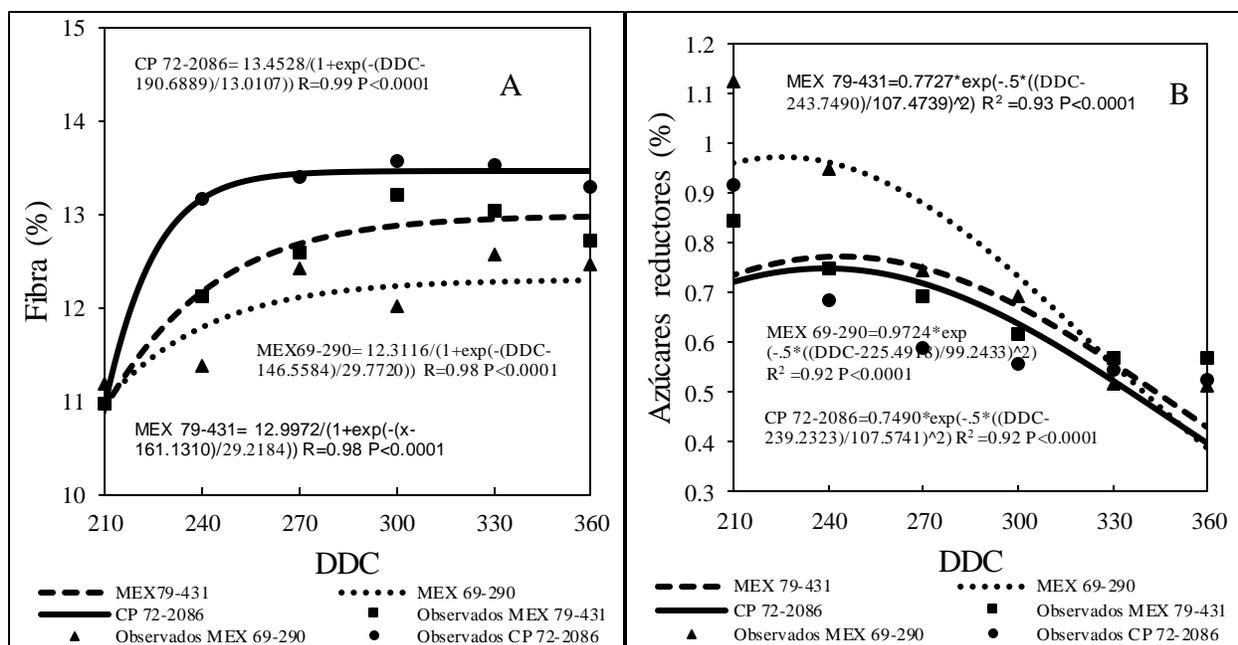


Figura 28. Dinámica del porcentaje de fibra (A) y azúcares reductores (B) de tres cultivares de caña de azúcar durante el ciclo soca en el área de abastecimiento del Ingenio Santa Rosalía de la Chontalpa.

## 5.8. Distribución de la biomasa radicular de cultivares de caña de azúcar durante el ciclo plantilla

### 5.8.1. Materia seca de raíces

En relación a la variable de biomasa de raíces esta mostró diferencia estadísticamente significativa por efecto de los cultivares de caña de azúcar cultivar (Cv), distribución vertical (DV), distribución horizontal (DH) y para sus interacciones. El cultivar CP 72-2086 presentó la cantidad de biomasa de raíces mayor ( $0.17 \text{ g dm}^3$ ) en comparación con los cultivares MEX 69-290 ( $0.09 \text{ g dm}^3$ ) y MEX 79-431 ( $0.10 \text{ g dm}^3$ ), estos dos últimos cultivares de caña de azúcar, no presentaron diferencia estadísticamente significativa (Cuadro 25). Lo cual coincide con Rodríguez-Gross *et al.* (2011) quienes evaluaron el sistema radicular de 11 genotipos de caña de azúcar en Cuba, reportando diferencias entre los materiales en cuanto a biomasa total de raíces.

Cuadro 25. Distribución vertical (DV) y horizontal (DH) de materia seca de raíces (g dm<sup>3</sup>) de tres cultivares (Cv) de caña de azúcar en el área de abastecimiento del Ingenio Santa Rosalía de la Chontalpa.

Interacción	DV (cm)	Cv			Media DV †	
		MEX 69-290	MEX 79-431	CP 72-2086		
Cv x DV	0-30	0.14 b	0.15 b	0.28 c	0.19 B	
	30-60	0.08 ab	0.11 ab	0.12 ab	0.10 A	
	60-90	0.04 a	0.05 a	0.11 ab	0.07 A	
	Media Cv	0.09 a	0.10 a	0.17 b		
Cv x DH		DH (cm)				
	Cv	0-37.5	37.5-75	75-112.5	112.5-150	
	MEX 69-290	0.05 a	0.14 ab	0.11 a	0.04 a	
	MEX 79-431	0.06 a	0.12 a	0.13 ab	0.10 a	
	CP 72-2086	0.09 a	0.23 bc	0.29 c	0.07 a	
Media DH	0.07 a	0.16 b	0.18 b	0.07 a		
Cv x DV x DH		DH (cm)				
	DV (cm)	0-37.5	37.5-75	75-112.5	112.5-150	
	MEX 69-290	0-30	0.08 a	0.24 ab	0.18 a	0.06 a
		30-60	0.03 a	0.12 a	0.10 a	0.05 a
		60-90	0.03 a	0.07 a	0.05 a	0.02 a
	MEX 79-431	0-30	0.06 a	0.18 a	0.21 a	0.15 a
		30-60	0.08 a	0.11 a	0.13 a	0.11 a
		60-90	0.05 a	0.06 a	0.05 a	0.03 a
	CP 72-2086	0-30	0.11 a	0.44 bc	0.52 c	0.06 a
		30-60	0.07 a	0.16 a	0.17 a	0.08 a
		60-90	0.09 a	0.10 a	0.18 a	0.07 a

C.V. (%) : 53.64

Probabilidad de F:

DMS

Cv 0.0001\*\* 0.03715

DV 0.0001\*\* 0.08732

DH 0.0001\*\* 0.10664

Cv x DV 0.0268\* 0.08732

Cv x DH 0.0003\*\* 0.10664

Cv x DV x DH 0.0384\* 0.21976

†Medias con una letra en común no son significativamente diferentes ( $p \leq 0.05$ ). Letras minúsculas representan diferencias horizontalmente y mayúsculas verticalmente. C.V. = Coeficiente de variación, \*diferencia estadística significativa a  $p \leq 0.05$ , \*\*diferencia estadística significativa alta a  $p \leq 0.01$ , DMS= diferencia media significativa. La distribución horizontal se midió a partir del centro de la calle (callejón).

En cuanto a la DV, de 0 a 30 cm, se registró la mayor cantidad de biomasa de raíces (0.19 g dm<sup>3</sup>), la cual es inferior a la media de 0.42 g dm<sup>3</sup> reportados por Baquero *et al.* (2012) para tres

cultivares de caña de azúcar a una profundidad de 10-20 cm; lo que implicaría revisar la preparación del suelo, donde el subsuelo y el arado con disco, son necesarios para romper las capas endurecidas del subsuelo. Entre 30-60 y 60-90 cm no se apreciaron diferencias estadísticamente significativas (0.10 y 0.07 g dm<sup>3</sup>, respectivamente). En cuanto a la interacción Cv x DV, el cultivar CP 72-2086 en 0-30 cm registró la biomasa de raíces mayor (0.28 g dm<sup>3</sup>), igual a la reportada por Silva-Olaya *et al.* (2017), para el cultivar de caña de azúcar RB86-7517 a una profundidad de 20-40 cm.

En cuanto a la DH, se observó que la cantidad de biomasa de raíces mayor se localizó de 37.5 a 75 cm (0.16 g dm<sup>3</sup>) y de 75 a 112.5 cm (0.18 g dm<sup>3</sup>). En lo que respecta a la interacción Cv x DH, los valores más altos de biomasa de raíces se observaron para el cultivar CP 72-2086 de 37.5-75 cm y de 75-112.5 cm. Esto es similar a lo descrito por Faroni y Trivelin (2006) quienes reportaron la mayor cantidad de biomasa seca de raíces al centro de la línea o cepa (2.02 g dm<sup>3</sup>) y en los primeros 14 cm a partir de la línea de caña (0.65 g dm<sup>3</sup>) y a una profundidad de 0-20 cm.

Considerando como referencia los valores medios de biomasa de raíces (g dm<sup>3</sup>) en la interacción Cv x DV x DH (por monolito), se calculó la biomasa de raíces por perfil, resultando en 23.2 g por perfil para el cultivar MEX 69 290, de los cuales el 54.4, 29.1 y 16.5% se registró de 0-30, 30-60 y 60-90 cm respectivamente. La biomasa de raíces para el cultivar MEX 79-431 ascendió a 27.5 g por perfil, distribuidos en 49.2, 35.2 y 15.6% de 0-30, 30-60 y 60-90 cm respectivamente. Mientras que para el cultivar CP 72-2086, la distribución de biomasa de raíces fue 55.1, 23.4 y 21.5% de 0-30, 30-60 y 60-90 cm respectivamente, registrando un total de 46.1 g por perfil (Cuadro 26). Estos valores son similares a los reportados por Rodríguez-Gross *et al.* (2011) quienes describieron que la densidad total de raíces por profundidad y localidad osciló entre 42.5 y 55.5% para la

profundidad de 0 a 20 cm, entre 24.6 y 27.0% para la profundidad de 20 a 40 cm, entre 13.4 y 18.9% para la profundidad de 40 a 60 cm y entre 5.6 y 11.7% para la profundidad de 60 a 80 cm.

Cuadro 26. Porcentaje de distribución vertical (DV) y horizontal (DH) de biomasa seca radicular para tres cultivares (Cv) de caña de azúcar durante el ciclo plantilla, en la zona de abastecimiento del Ingenio Santa Rosalía de la Chontalpa.

Cv	DV (cm)	DH (cm)				$\sum$ DV†
		0-37.5	37.5-75	75-112.5	112.5-150	
MEX 69-290	0-30	7.8†	23.3	17.5	5.8	54.4
	30-60	2.9	11.6	9.7	4.9	29.1
	60-90	2.9	6.8	4.9	1.9	16.5
	$\sum$ DH	13.6	41.7	32.0	12.6	
MEX 79-431	0-30	4.9	14.8	17.2	12.3	49.2
	30-60	6.6	9.0	10.7	9.0	35.2
	60-90	4.1	4.9	4.1	2.5	15.6
	$\sum$ DH	15.6	28.7	32.0	23.8	
CP 72-2086	0-30	5.4	21.5	25.4	2.9	55.1
	30-60	3.4	7.8	8.3	3.9	23.4
	60-90	4.4	4.9	8.8	3.4	21.5
	$\sum$ DH	13.2	34.1	42.4	10.2	

†Porcentajes calculados a partir de los valores medios de biomasa seca de raíces (g dm<sup>3</sup>) de la interacción Cv x DV x DH del Cuadro 25 y la materia seca de raíces por perfil.

Hasta los 60 cm de profundidad, el porcentaje de biomasa radical acumulado para los cultivares de caña de azúcar fue de 83.5, 84.4, y 78.5% para MEX 69-290, MEX 79-431 y CP 72-2086, lo cual indica que, con los datos obtenidos en el presente trabajo, la profundidad efectiva de enraizamiento fue de 60 cm. En este contexto, Ohashi *et al.* (2015), reportaron que la profundidad efectiva de enraizamiento varió durante el ciclo de cultivo para IACSP94-2094 (de 0.6 m a 58 días a 0.4 m a 123 días después del rebrote), pero todos los cultivares presentaron una profundidad efectiva de 0.4 m bajo fertirrigación por goteo subsuperficial.

En cuanto a la DH, el mayor porcentaje de biomasa de raíces por cultivar, se concentró entre 37.5 y 112.5 cm a partir del centro de la calle, con valores de 60.7, 73.7, y 76.5% para MEX 79-431, MEX 69-290 y CP 72-2086, respectivamente; siendo esta distancia y 60 cm de profundidad,

donde se localiza el 51.7, 62.2 y 63.0% del volumen total de raíces para MEX 79-431, MEX 69-290 y CP 72-2086, respectivamente. Según Faroni y Trivelin (2006), hay una mayor distribución porcentual de raíces metabólicamente activas en profundidad que en la superficie del perfil, representando el 31% en la capa de 60-80 cm y el 23% en la capa de 0-20 cm. Por su parte, Romero *et al.* (2015), reportaron que el 50 y 80% del total de raíces cuantificadas se localizó a 15.0 y 35.0 cm respectivamente, en secano.

Con base en el valor medio de la densidad aparente del suelo ( $1.1 \text{ g cm}^3$ ) y los valores medios de biomasa de raíces ( $\text{g dm}^3$ ) por perfil, se estimó la cantidad de biomasa de raíces por  $\text{kg}^{-1}$  y por  $\text{ha}^{-1}$  de suelo (Figura 29).

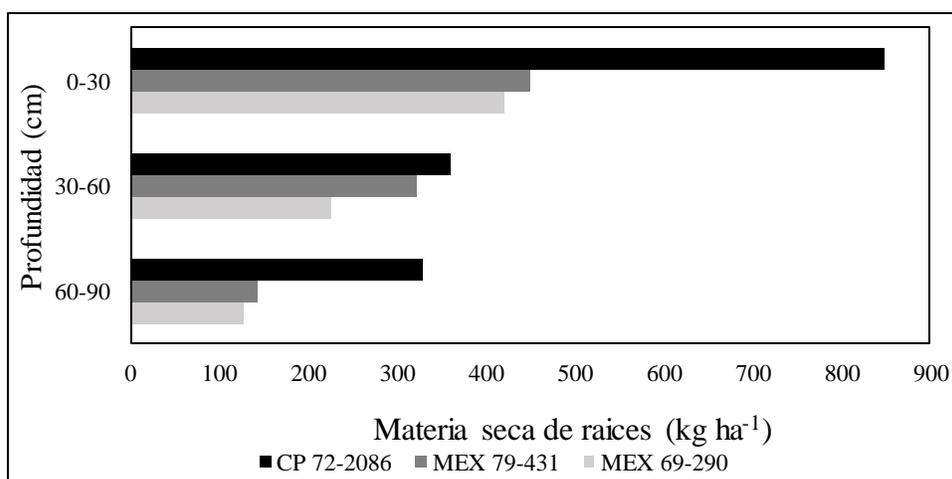


Figura 29. Biomasa seca de raíces ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) de tres cultivares de caña de azúcar, en tres profundidades de muestreo, durante el ciclo plantilla.

El cultivar MEX 69-290 presentó valores de 0.13, 0.07 y 0.04  $\text{g kg}^{-1}$ , equivalentes a 420, 225 y 128  $\text{kg ha}^{-1}$  en profundidades de 0-30, 30-60 y 60-90 cm respectivamente. El cultivar MEX 79-431 registró valores de 0.14, 0.10 y 0.04  $\text{g kg}^{-1}$ , equivalentes a 450, 323 y 143  $\text{kg ha}^{-1}$  en profundidades de 0-30, 30-60 y 60-90 cm, respectivamente. Mientras que para el cultivar CP 72-2086, se obtuvieron valores de 0.26, 0.11 y 0.10  $\text{g kg}^{-1}$ , equivalentes a 848, 360 y 330  $\text{kg ha}^{-1}$  en profundidades de 0-30, 30-60 y 60-90 cm respectivamente.

### 5.8.2. Resistencia a la penetración

La resistencia a la penetración (RP) indica el nivel de compactación de un suelo. Un suelo compactado limita el crecimiento de raíces y la cantidad de aire y agua del que disponen las raíces (Zerpa *et al.*, 2013).

Para resistencia a la penetración (RP), no se encontró diferencia estadísticamente significativa entre Cv, pero sí para la DV y la interacción Cv x DV (Cuadro 27). La profundidad a la que se observó la mayor RP fue en los primeros 30 cm (3.96 MPa), disminuyendo este valor conforme aumenta la profundidad de muestreo, obteniendo valores de 3.05 y 2.5 MPa de 30-60 y de 60-90 cm respectivamente, lo cual se atribuye a una deficiente preparación del suelo donde la compactación permanece. En este sentido, Otto *et al.* (2011), concluyeron que la RP fue mayor en la superficie del suelo (alcanzando 1.93nMPa en la posición entre hileras) y disminuyó con la profundidad.

En relación a la interacción Cv x DV, se encontró diferencia estadística significativa, el cultivar MEX 79-431, en los primeros 30 cm, el que presentó el valor de RP menor (3.38 MPa) en comparación con los cultivares MEX 69-290 (4.24 MPa) y CP 72-2086 (4.27 MPa), respecto a estos dos últimos cultivares, no se encontró diferencia estadística significativa entre ellos. Según Tavares *et al.* (2001), un valor de RP de 2 MPa normalmente se considera alto para el desarrollo de sistemas de raíces de cultivos, aunque el valor crítico puede variar ampliamente de acuerdo con la textura del suelo, las condiciones estructurales y el manejo, así como el tipo de cultivo. En el presente trabajo, los valores medios 3.96, 3.05 y 2.5 MPa, para las profundidades 0-30, 30-60 y 60-90 cm, respectivamente, están por encima del valor crítico, por lo que restringe el desarrollo de la raíz del cultivo, tal como lo describió Otto *et al.* (2011). Estos autores observaron que el crecimiento de la raíz de la caña de azúcar no fue afectado por valores de RP menores a 0.75 MPa,

pero disminuyó significativamente entre 0.75 y 2.0 MPa y fue severamente restringido con valores de RP >2.0 MPa.

Cuadro 27. Distribución vertical (DV) y horizontal (DH) de la resistencia a la penetración (MPa) del suelo cultivado con tres cultivares (Cv) de caña de azúcar en el área de abastecimiento del Ingenio Santa Rosalía de la Chontalpa.

Interacción	DV (cm)	Cv			Media DV†
		MEX 69-290	MEX 79-431	CP 72-2086	
Cv x DV	0-30	4.24 d	3.38 c	4.27 d	3.96 C
	30-60	2.84 abc	3.05 bc	3.25 c	3.05 B
	60-90	2.16 a	3.02 bc	2.33 ab	2.5 A
	Media Cv	3.08	3.15	3.28	
		DH (cm)			
	Cv	0-37.5	37.5-75	75-112.5	112.5-150
Cv x DH	MEX 69-290	3.14	2.97	2.98	3.22
	MEX 79-431	3.10	3.25	3.09	3.16
	CP 72-2086	3.41	3.17	3.17	3.39
	Media DH	3.22	3.13	3.08	3.26
C.V. (%)	20.62				
Probabilidad de F:	DMS				
Cv	0.4029NS	0.36887			
DV	0.0001**	0.36887			
DH	0.7499NS	0.4681			
Cv x DV	0.0001**	0.85379			
Cv x DH	0.9755NS	1.0413			

†Medias con una letra en común no son significativamente diferentes ( $p \leq 0.05$ ). Letras minúsculas representan diferencias horizontalmente y mayúsculas verticalmente. C.V. = Coeficiente de variación, NS = diferencia estadística no significativa  $p \leq 0.05$ , \*\*diferencia estadística significativa alta a  $p \leq 0.01$ , DMS = diferencia media significativa.

## 5.9. Estimación del porcentaje de cobertura y rendimiento de cultivares de caña de azúcar a través del modelo AquaCrop

### 5.9.1. Porcentaje de cobertura

Los resultados obtenidos para el ciclo plantilla, muestran que el porcentaje de cobertura (CC) observado y el simulado por el modelo AquaCrop, presentó un coeficiente de determinación ( $r^2$ ) de 0.88 a 0.97, error cuadrático medio (RMSE) de 8.2 a 20.4%, índice de eficiencia de Nash y Sutcliffe ( $E$ ) de 0.42 a 0.90, por lo cual se clasifica de bueno a excelente de acuerdo con Molnar (2011) y un índice de concordancia de Willmott ( $d$ ) que varió de 0.83 a 0.98 en las nueve parcelas

comerciales evaluadas (Cuadro 28). Los estadísticos obtenidos demuestran la eficiencia del modelo AquaCrop para simular el CC durante el ciclo plantilla, y son mejores a los obtenidos por Alencar (2014), quien reportó un *E* de -4.16 a 0.70 para los cultivares de caña de azúcar RB92579, RB93509, SP79-1011 (en la localidad de Río Largo, Alagoas, Brasil) y SP81-3250 (en la localidad Campos de los Goytacazes, Río de Janeiro, Brasil) durante el ciclo plantilla en la parametrización y validación del modelo AquaCrop.

Cuadro 28. Relación entre el porcentaje de cobertura (CC) medido con la aplicación Canopeo (observado) y el simulado a través del modelo AquaCrop en nueve parcelas comerciales durante el ciclo plantilla.

Parcela	Cultivar	DDS	CC		$r^2$	RMSE (%)	CV RMS E (%)	<i>E</i>	<i>d</i>
			Observado	Simulado					
1	MEX 79-431	60	17.0	5.2	0.97	14.8	24.9	0.74	0.93
		90	30.3	15.3					
		120	48.7	43.5					
		150	79.8	61.5					
		180	86.9	66.2					
		210	93.6	81.0					
2	MEX 69-290	60	9.6	6.9	0.92	9.4	18.3	0.85	0.96
		90	36.2	18.8					
		120	50.4	48.6					
		150	56.2	60.0					
		180	73.8	62.1					
		210	81.9	73.7					
3	MEX 79-431	60	8.7	6.1	0.88	16.2	25.9	0.72	0.93
		90	48.4	17.1					
		120	48.9	48.8					
		150	81.7	70.4					
		180	91.6	77.3					
		210	96.3	82.2					
4	MEX 69-290	60	22.2	9.2	0.93	8.9	15.0	0.88	0.97
		90	39.4	39.5					
		120	64.9	78.8					
		150	80.2	83.9					
		180	90.9	86.0					
5	CP 72-2086	60	11.7	3.3	0.91	10.1	22.8	0.82	0.96
		90	24.0	10.5					
		120	35.2	33.8					
		150	46.4	65.6					

		180	68.0	67.4					
		210	79.1	81.5					
6	CP 72-2086	60	20.6	6.6	0.97	20.4	34.2	0.42	0.83
		90	37.7	23.8					
		120	63.3	38.2					
		150	82.5	60.9					
		180	91.6	75.2					
7	CP 72-2086	60	10.6	22.4	0.95	14.0	24.1	0.81	0.93
		90	48.1	57.0					
		120	76.6	64.2					
		150	96.9	76.7					
8	MEX 79-431	60	21.2	10.5	0.92	12.8	20.2	0.75	0.94
		90	44.7	27.0					
		120	54.5	60.0					
		150	80.7	67.8					
		180	85.7	70.3					
9	MEX 69-290	210	93.7	82.4	0.97	8.2	17.9	0.90	0.98
		60	7.1	4.5					
		90	20.3	14.6					
		120	43.9	46.7					
		150	53.5	69.4					
		180	68.1	77.1					
		210	82.6	87.6					

DDS= días después de la siembra  $r^2$ = coeficiente de determinación, RMSE= raíz del error cuadrático medio, CV RMSE= coeficiente de variación de la raíz del error cuadrático medio,  $E$ = índice de eficiencia de Nash y Sutcliffe,  $d$ = índice de concordancia de Willmott.

Para el ciclo soca, los resultados muestran un  $r^2$  que varió de 0.62-0.99, el RMSE de 8.7 a 15.2,  $E$  de 0.54 a 0.87 (bueno a excelente) y  $d$  que varió de 0.83 a 0.98 en las nueve parcelas comerciales evaluadas (Cuadro 29), estos estadísticos son mejores a los obtenidos por Alencar (2014), quien reportó un  $E$  de -4.29 a 0.99 para los cultivares RB92579, RB93509, RB867515, SP79-1011 y SP81-3250 en las localidades Juazeiro Bahias, Coruripe Alagoas, Carpina, Río Largo Alagoas, y Campos de los Goytacazes, Río de Janeiro, Brasil.

De acuerdo con Farahani *et al.* (2009), la simulación correcta de la cobertura del suelo es fundamental para el desempeño de AquaCrop, ya que afecta la tasa de transpiración y consecuentemente la acumulación de biomasa.

Cuadro 29. Relación entre el porcentaje de cobertura (CC) medido con la aplicación Canopeo (observado) y el simulado a través del modelo AquaCrop en nueve parcelas comerciales durante el ciclo soca.

Parcela	Cultivar	DDC	CC		$r^2$	RMSE (%)	CV	RMSE (%)	$E$	$d$
			Observado	Simulado						
1	MEX 79-431	30	19.8	6.2	0.94	10.4	19.5	0.80	0.96	
		60	36.4	20.2						
		90	53.1	60.2						
		120	74.0	68.4						
		150	82.2	78.5						
2	MEX 69-290	30	26.7	11.6	0.94	10.5	19.1	0.70	0.94	
		60	42.6	28.2						
		90	54.1	56.9						
		120	69.6	61.4						
		150	81.0	74.9						
3	MEX 79-431	30	16.1	10.3	0.85	15.2	34.1	0.54	0.83	
		60	25.9	30.9						
		90	43.4	32.3						
		120	60.0	47						
		150	77.9	49.5						
4	MEX 69-290	30	26.4	17.2	0.62	13.4	23.7	0.59	0.88	
		60	44.5	53.1						
		90	54.3	72.4						
		120	72.8	69.5						
		150	85.7	65.6						
5	CP 72-2086	30	16.0	12.6	0.92	9.5	19.5	0.84	0.95	
		60	28.9	38.4						
		90	49.6	45.4						
		120	67.8	55.7						
		150	80.5	67						
6	CP 72-2086	30	16.7	10.8	0.90	14.4	29.0	0.64	0.93	
		60	32.8	15.1						
		90	49.9	23.7						
		120	63.2	62.5						
		150	85.5	84.6						
7	CP 72-2086	30	24.4	11.6	0.99	8.7	14.1	0.87	0.98	
		60	44.2	30.8						
		90	67.5	70.1						
		120	82.5	85.5						
		150	90.5	94.9						
8	MEX 79-431	30	17.4	7.5	0.94	12.2	24	0.65	0.93	
		60	39.2	19.4						
		90	54.0	49.6						

		120	69.2	54.5					
		150	74.3	70.1					
		30	13.8	11.1					
		60	28.1	12.2					
9	MEX 69-290	90	48.0	20.4	0.78	14.7	31.6	0.60	0.92
		120	66.4	43.8					
		150	75.8	82.6					

DDC= días después de la cosecha  $r^2$ = coeficiente de determinación, RMSE= raíz del error cuadrático medio, CV RMSE= coeficiente de variación de la raíz del error cuadrático medio,  $E$ = índice de eficiencia de Nash y Sutcliffe,  $d$ = índice de concordancia de Willmott.

Para evaluar la capacidad predictiva del modelo AquaCrop, para el porcentaje cobertura del suelo, se representaron gráficamente los grupos de valores observados frente a los simulados de las tres parcelas por cultivar, ilustrando así el grado con el que los puntos se distribuyen sobre la recta 1:1, para cada cultivar. Los resultados en ciclo plantilla, mostraron un  $r^2$ = 0.90, 0.93 y 0.80 RMSE= 8.8, 14.6 y 14.3% y  $E$ = 0.88, 0.74 y 0.71 (de muy bueno a excelente) para los cultivares MEX 69-290, MEX 79-431 y CP 72-2086, respectivamente (Figura 30). Dichos estadísticos califican de muy bueno a excelente el desempeño del modelo AquaCrop para predecir el CC en los cultivares de caña de azúcar en estudio durante el ciclo plantilla y son mejores a los reportados por Alencar (2014) para los cultivares RB92579, RB93509, RB867515 y SP79-1011 durante el ciclo plantilla, quien observó valores de RMSE entre 12.1 y 21.5% y  $E$  de -0.13 a 0.79.

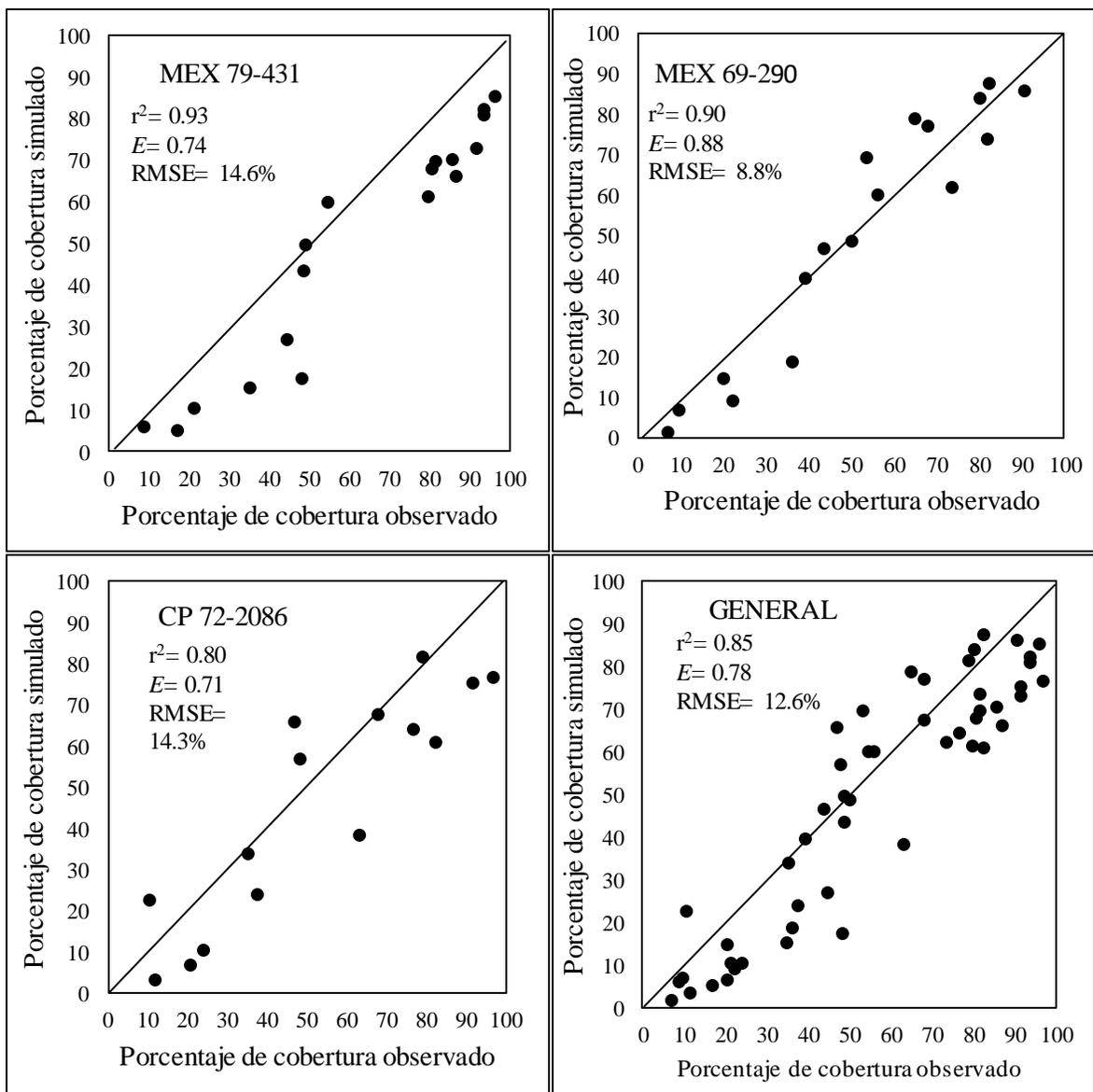


Figura 30. Relación entre el porcentaje de cobertura medido con la aplicación Canopeo (observado) y el simulado a través del modelo AquaCrop en tres cultivares de caña de azúcar durante el ciclo plantilla.

En el ciclo soca se encontró un  $r^2 = 0.77$ ,  $0.86$  y  $0.90$   $RMSE = 12.9$ ,  $12.6$  y  $10.9\%$  y  $E = 0.63$ ,  $0.66$  y  $0.78$  (muy bueno) para los cultivares MEX 69-290, MEX 79-431 y CP 72-2086, respectivamente (Figura 31), calificando de muy bueno a excelente el desempeño del modelo AquaCrop para predecir el CC en cultivares de caña de azúcar durante el ciclo soca, estos estadísticos son similares a los descritos por Mabhaudhi *et al.* (2014), quienes calibraron el modelo

AquaCrop con un  $r^2= 0.78$ ;  $RMSE = 2.3 \%$  y  $d = 0.92$  y lo validaron con  $r^2= 0.84$ ;  $RMSE = 1.8\%$  y  $d = 0.99$  para porcentaje de cobertura.

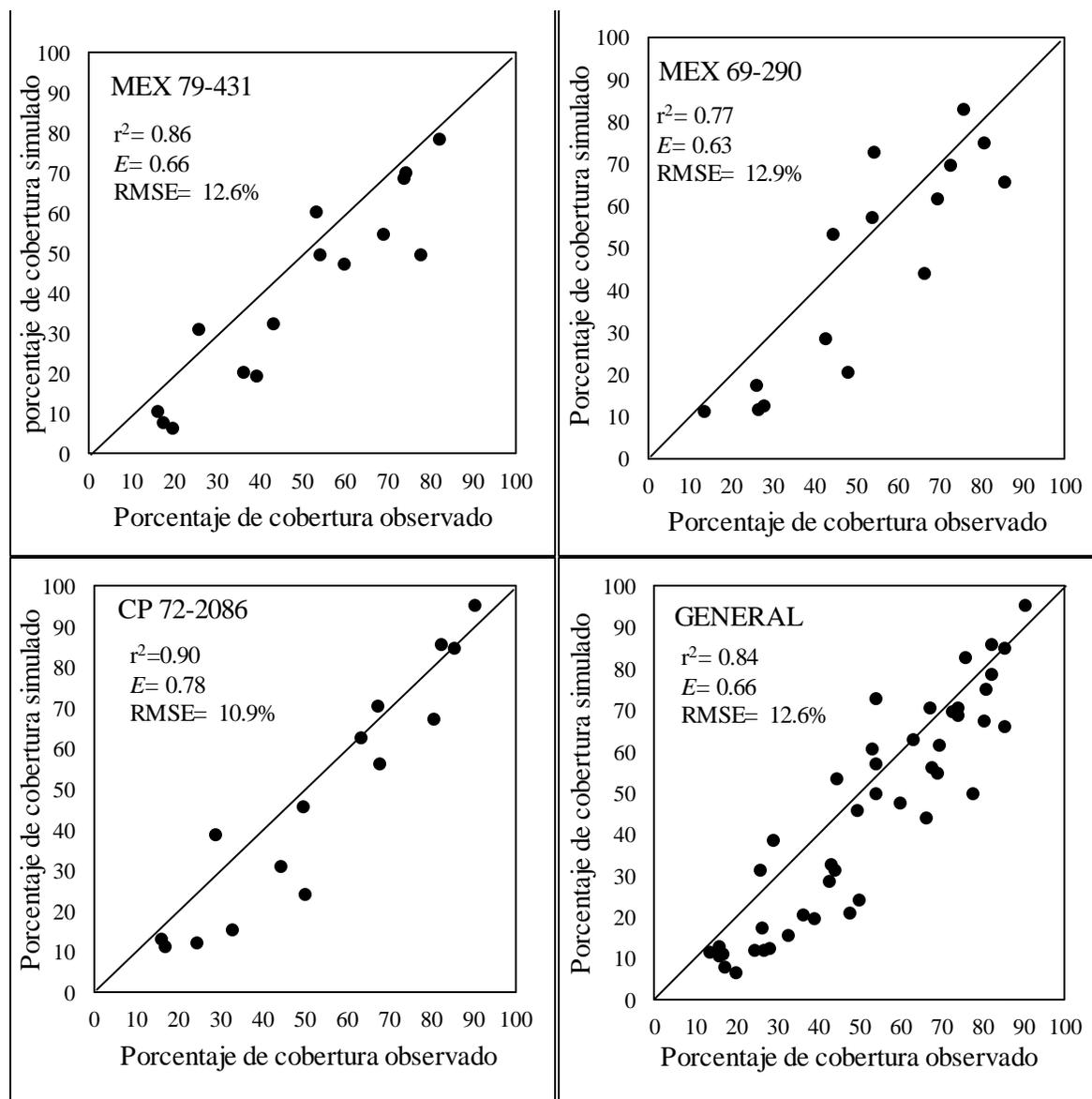


Figura 31. Relación entre el porcentaje de cobertura medido con la aplicación Canopeo (observado) y el simulado a través del modelo AquaCrop en tres cultivares de caña de azúcar durante el ciclo soca.

### 5.9.2. Biomasa de tallos ( $t\ ha^{-1}$ )

El modelo AquaCrop demostró ser una herramienta útil y confiable para simular la biomasa de tallos en el cultivo de caña de azúcar, toda vez que el  $r^2$  varió de 0.90 a 0.99 en el ciclo plantilla (Cuadro 30) y de 0.88 a 0.99 en el ciclo soca (Cuadro 31) en las nueve parcelas comerciales

evaluadas, estos resultados son mejores a los obtenidos por Bedane (2018), quien llevó a cabo la calibración y validación del modelo AquaCrop en parcelas con diferentes clases de textura de suelo, reportando un  $r^2$  de 0.14 a 0.98 en 12 parcelas en la calibración, mientras que, en la validación, el  $r^2$  varió de 0 a 0.95 en 18 parcelas comerciales.

Cuadro 30. Relación entre la biomasa de tallos observada y la simulada a través del modelo AquaCrop en nueve parcelas comerciales de caña de azúcar, durante el ciclo plantilla.

Parcela	Cultivar	DDS	Biomasa de tallos (t ha <sup>-1</sup> )		$r^2$	RMSE (t ha <sup>-1</sup> )	CV RMSE (%)	<i>E</i>	<i>d</i>
			Observada	Simulada					
1	MEX 79-431	120	6.5	3.0	0.97	3.1	14.1	0.95	0.99
		180	7.4	8.2					
		270	23.0	19.0					
		360	29.1	30.7					
		450	44.3	40.1					
2	MEX 69-290	120	3.6	3.6	0.98	2.2	11.6	0.97	0.99
		180	4.6	10.8					
		270	19.1	18.0					
		360	27.3	30.3					
		450	38.7	39.9					
3	MEX 79-431	120	9.1	4.0	0.95	6.1	23.9	0.86	0.96
		180	10.2	12.3					
		270	35.4	20.8					
		360	47.5	33.6					
4	MEX 69-290	120	14.4	7.0	0.98	5.2	24.3	0.45	0.90
		180	18.9	15.0					
		270	31.0	27.8					
5	CP 72-2086	120	1.7	2.0	0.94	1.4	10.8	0.98	0.99
		180	5.8	7.1					
		270	17.8	15.4					
		360	25.6	25.4					
6	CP 72-2086	120	11.4	4.4	0.99	5.5	22.2	0.71	0.95
		180	16.8	10.7					
		270	23.1	21.3					
		360	35.0	36.2					
		450	38.3	48.0					
7	CP 72-2086	120	15.3	7.1	0.90	8.9	26.1	0.34	0.90
		180	29.9	14.8					
		270	36.7	27.4					
		360	42.8	41.8					
		450	46.3	50.2					
8	MEX 79-431	120	8.1	5.1	0.92	4.5	17.7	0.90	0.98

		180	8.6	10.6					
		270	30.9	22.4					
		360	38.0	35.5					
		450	43.0	46.4					
		120	7.2	2.8					
		180	12.5	8.4					
9	MEX 69-290	270	24.3	18.3	0.97	3.9	18.6	0.83	0.97
		360	29.7	28.5					
		450	31.5	33.0					

DDS= días después de la siembra  $r^2$ = coeficiente de determinación, RMSE= raíz del error cuadrático medio, CV RMSE= coeficiente de variación de la raíz del error cuadrático medio,  $E$ = índice de eficiencia de Nash y Sutcliffe,  $d$ = índice de concordancia de Willmott.

El  $d$  varió de 0.90 a 0.99 en los dos ciclos evaluados, mientras que el  $E$  varió de 0.34 a 0.98 (de satisfactorio a excelente) en ciclo planta y de 0.64 a 0.99 (de muy bueno a excelente) en ciclo soca, para las nueve parcelas comerciales evaluadas. Estos estadísticos son parecidos a los descritos por Alencar (2014), quien reportó un  $E$  de 0.29 a 0.93 y  $d$  que varió de 0.89 a 0.98 en 10 plantaciones de distintos cultivares durante el ciclo plantilla, mientras que para el ciclo soca encontró un  $E$ = 0.86 y 0.98 y un  $d$ = 0.97 y 0.99 para una plantación con los cultivares SP81-3250 y RB92579 respectivamente.

Cuadro 31. Relación entre la biomasa de tallos observada y la simulada a través del modelo AquaCrop en nueve parcelas comerciales de caña de azúcar, durante el ciclo soca.

Parcela	Cultivar	DDC	Biomasa de tallos (t ha <sup>-1</sup> )		$r^2$	RMSE (t ha <sup>-1</sup> )	CV RMSE (%)	$E$	$d$
			Observada	Simulada					
1	MEX 79-431	180	9.0	12.0	0.88	4.0	21.8	0.77	0.93
		270	16.7	22.6					
		360	28.9	27.3					
2	MEX 69-290	180	8.2	12.3	0.99	3.1	15.4	0.89	0.96
		270	21.3	23.0					
		360	30.7	27.8					
3	MEX 79-431	180	7.7	8.8	0.99	1.0	6.0	0.98	0.99
		270	17.6	18.7					
		360	26.7	25.8					
4	MEX 69-290	180	9.2	13.5	0.99	2.8	13.6	0.90	0.90
		270	21.9	22.8					
		360	30.0	28.3					

5	CP 72-2086	180	7.4	9.9	0.99	2.7	18.4	0.72	0.94
		270	15.6	18.1					
		360	19.6	22.6					
6	CP 72-2086	180	9.9	10.6	0.99	0.90	5.2	0.98	0.99
		270	18.8	20.1					
		360	25.4	24.7					
7	CP 72-2086	180	11.3	14.2	0.98	3.3	18.1	0.64	0.92
		270	19.1	23.5					
		360	25.0	27.5					
8	MEX 79-431	180	10.9	10.4	0.99	2.0	11.2	0.86	0.97
		270	18.3	20.9					
		360	24.0	26.1					
9	MEX 69-290	180	10.0	9.8	0.99	0.7	3.8	0.99	0.99
		270	20.1	19.0					
		360	23.2	23.0					

DDC= días después de la cosecha,  $r^2$ = coeficiente de determinación, RMSE= raíz del error cuadrático medio, CV RMSE= coeficiente de variación de la raíz del error cuadrático medio,  $E$ = índice de eficiencia de Nash y Sutcliffe,  $d$ = índice de concordancia de Willmott.

Uno de los principales problemas en la utilización de modelos es la subjetividad en la realización de la clasificación de los mismos. No se encuentra en la literatura un valor de referencia mostrando los errores aceptables para una determinada aplicación del modelo, por ello, se adoptó el propuesto por Alencar (2014), quien utilizando la metodología propuesta por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA) para el cultivo de la caña de azúcar, consideró un error medio de 8% a un nivel de significancia del 95%, estableciendo que los errores tolerados deben ser de más o menos 16% en relación al valor observado. Este valor puede servir como referencia en la evaluación de modelos que estiman la producción de caña de azúcar. El RMSE en el presente trabajo, varió de 1.4 a 8.9 t ha<sup>-1</sup> en el ciclo plantilla y de 0.70 a 4.0 t ha<sup>-1</sup> en el ciclo soca en las nueve parcelas comerciales evaluadas, estos valores son similares a los reportados por Alencar (2014) para 13 plantaciones de distintos cultivares de caña de azúcar y en distintas localidades durante los ciclos plantilla y soca en Brasil, donde los errores en la estimación de biomasa final fueron de 2.41 a 16.63 t ha<sup>-1</sup>. Por otra parte, Bedane (2018), reportó un RMSE de

3.75 a 13.46 t ha<sup>-1</sup> en 12 parcelas en la calibración, mientras que, en la validación, fue de 5.67 a 20.07 t ha<sup>-1</sup> en 18 parcelas comerciales.

Al representar gráficamente los grupos de valores de biomasa de tallos observada para las parcelas correspondientes a cada cultivar, frente a los simulados por el modelo AquaCrop, se ilustró el grado con el que los puntos se distribuyen sobre la recta 1:1, para cada cultivar, evaluando así, la capacidad de predicción del modelo. Los resultados mostraron un  $r^2= 0.89, 0.94$  y  $0.87$ , RMSE= 3.8, 4.6 y 6.3 t ha<sup>-1</sup> y  $E= 0.75, 0.90$  y  $0.70$  (de muy bueno a excelente) en ciclo plantilla (Figura 32) y  $r^2= 0.95, 0.91$  y  $0.95$  RMSE= 2.2, 2.3 y 2.3 t ha<sup>-1</sup> y  $E= 0.93, 0.87$  y  $0.78$  (de muy bueno a excelente) en ciclo soca (Figura 33) para los cultivares MEX 69-290, MEX 79-431 y CP 72-2086, respectivamente. Estos valores son superiores a los descritos por Moreto (2019), quien concluyó que la precisión en la validación fue ligeramente baja ( $r^2=0.42$ ) y adecuada en la calibración ( $r^2= 0.70$ ) con un RMSE menor al 10%.

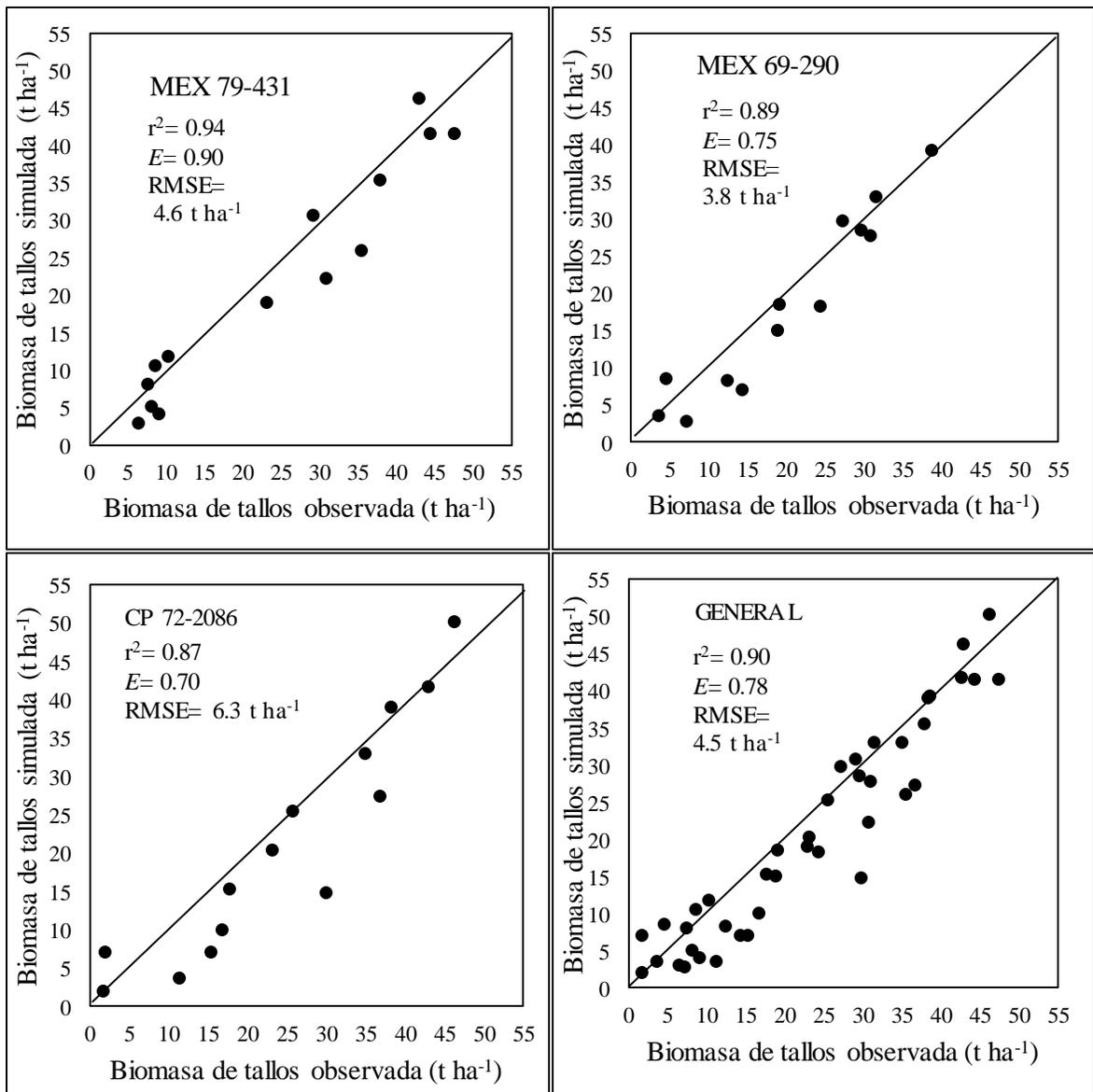


Figura 32. Relación entre la biomasa de tallos observada y la simulada a través del modelo AquaCrop en tres cultivares de caña de azúcar durante el ciclo plantilla.

Los resultados son también similares a los reportados por Bahmani y Eghbalian (2018), quienes utilizaron el modelo AquaCrop para evaluar la respuesta de la caña de azúcar a escenarios de estrés por déficit hídrico en Khuzestan, Iran, resultando el modelo una herramienta apropiada para simular el rendimiento de la caña de azúcar ( $r^2=0.80$ ,  $RMSE = 1.7$ ,  $E=0.57$  y  $d=0.91$ ) y la productividad del agua bajo condiciones de déficit hídrico ( $r^2=0.99$ ,  $RMSE=0.06$ ,  $E=0.97$  y  $d=0.99$ ). Por otro lado, se ha observado que el modelo puede subestimar el rendimiento, Kunz *et*

al. (2014) observaron una subestimación significativa del rendimiento en seis de ocho tratamientos usando AquaCrop, sin embargo, al recalibrar el modelo, la subestimación del rendimiento solo ocurrió en un tratamiento.

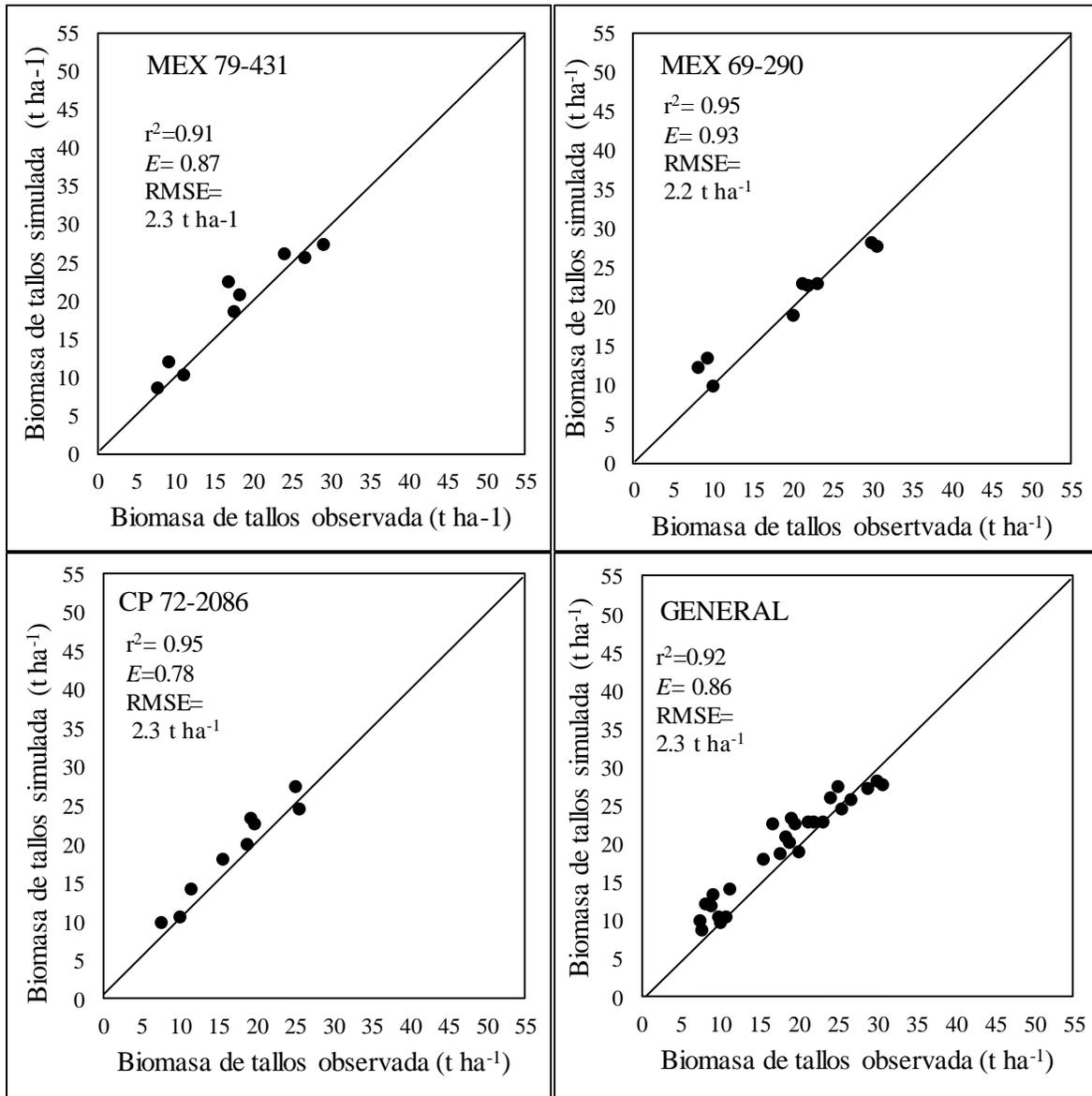


Figura 33. Relación entre la biomasa de tallos observada y la simulada a través del modelo AquaCrop en tres cultivares de caña de azúcar durante el ciclo soca.

## 6. CONCLUSIONES

El número de hijuelos fue mayor en ciclo soca que en ciclo plantilla para los cultivares evaluados. En ciclo plantilla, el mayor número de hijuelos (15.27) se observó a los 120 días después de la siembra (DDS), mientras que en el ciclo soca (24.1) se registró a los 60 días después de la cosecha (DDC). Los cultivares MEX 79-431 y MEX 69-290, presentaron respectivamente, el mayor y menor número de hijuelos durante los dos ciclos evaluados. El incremento en el número de hijuelos en el ciclo soca respecto al de plantilla fue 97.2, 104.3 y 112.1% para los cultivares CP 72-2086, MEX 69-290 y MEX 79 43, respectivamente.

El número de tallos entre los cultivares de caña de azúcar fue similar en el ciclo plantilla, pero en el ciclo soca, el cultivar MEX 79-431, presentó el mayor valor para esta variable. En el ciclo plantilla, el número de tallos se estabilizó a partir de los 210 DDS, mientras que en el ciclo soca a partir de 180 DDC. El cultivar CP 72-2086 presentó mayor altura de tallo con 2.32 m y una tasa de elongación de tallo (TET) máxima de 10.5 mm día<sup>-1</sup>, alcanzada a los 240 DDS en el ciclo de plantilla y 2.08 m y una TET máxima de 10.7 mm día<sup>-1</sup> a los 210 DDC en el ciclo de soca, mientras que MEX 79-431, obtuvo el valor más bajo para altura de tallo con 2.03 y 1.92 m y una TET máxima de 12.1 y 10.5 mm día<sup>-1</sup> a los 210 DDS durante el ciclo plantilla y 210 DDC en el ciclo soca respectivamente. El crecimiento de tallos se estabilizó a partir de los 330 DDS en ciclo plantilla y también en el ciclo soca.

El diámetro de tallo se redujo de acuerdo con la edad del cultivo y su media varió de 27.38 a 29.55 mm en el ciclo plantilla y de 25.41 a 27.83 mm en el ciclo soca. El descenso en el diámetro de tallos fue de 7.5% para MEX 69-290, 5.4% para CP 72-2086 y 6.1% para MEX 79-431, respecto al ciclo plantilla. El mayor diámetro de tallos correspondió al cultivar MEX 79-431, durante los dos ciclos evaluados.

El rendimiento de caña varió con la edad del cultivo y el cultivar. En el ciclo plantilla, los cultivares presentaron el siguiente orden a los 450 DDS: CP-72-2086>MEX 79-431>MEX69-290 con 144.73, 130.09 y 94.18 t ha<sup>-1</sup>, respectivamente. Contrariamente, durante el ciclo soca a 360 DDC, MEX 69-290 fue el cultivar que presentó el rendimiento de tallos más alto (102.21 t ha<sup>-1</sup>), seguido de MEX 79-431 (98.81 t ha<sup>-1</sup>) y CP 72-2086 (87.46 t ha<sup>-1</sup>). Los cultivares evaluados, presentaron en el ciclo soca, una reducción del rendimiento de 14.5, 30.9 y 32.5% para MEX 69-290, MEX 79-431 y CP 72-2086, respectivamente, con respecto al ciclo plantilla.

La tasa de crecimiento absoluto máxima alcanzada para MEX 69-290, CP 72-2086 y MEX 79-431 fue de 187, 192 y 262 kg ha<sup>-1</sup> día<sup>-1</sup> a los 210 DDS en el ciclo plantilla, y de 193, 177 y 151 kg ha<sup>-1</sup> día<sup>-1</sup> a los 180 DDC en el ciclo soca, respectivamente. El índice de cosecha varió entre cultivares y edad del cultivo. En el ciclo plantilla fue de 0.69, 0.70 y 0.74 para los cultivares MEX 69-290, CP72-2086 y MEX 79-431, respectivamente, mientras que en el ciclo soca fue de 0.62, 0.69 y 0.7 para CP 72-2086, MEX 79-431 y MEX 69-290, respectivamente.

El porcentaje de cobertura mayor y menor, durante el ciclo plantilla, fue observado en los cultivares MEX 79-431 y MEX 69-290, respectivamente, mientras que, en el ciclo soca, CP 72-2086 fue el cultivar con el mayor porcentaje de cobertura y MEX 79-431 con el más bajo. El índice de área foliar (IAF) máximo para los cultivares MEX 69-290, MEX 79-431 y CP 72-2086, en el ciclo plantilla fue de 6.4 (a los 360 DDS), 6.7 (a los 420 DDS) y 6.79 (a los 360 DDS), respectivamente. En el ciclo soca, el IAF máximo para MEX 79-431, CP 72-2086 y MEX 69-290 fue de 6.76, (240 DDC) 6.92 (270 DDC) y 6.97 (300 DDC), respectivamente.

El índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI, por sus siglas en inglés) solo mostró diferencia estadísticamente significativa entre cultivares, durante el ciclo plantilla. El mayor NDVI durante el ciclo plantilla, fue de 0.74 para MEX 69-290 (210 DDS), 0.73 para CP 72-2086 (330

DDS) y 0.77 para MEX 79-431 (180 DDS). Durante el ciclo soca, fue 0.72 para MEX 69-290 y CP 72-2086 a 150 DDC y 0.73 para MEX 79-431 a 180 DDS.

El índice de vegetación que presentó mayor correlación con el rendimiento de caña para los tres cultivares y durante los dos ciclos fue el porcentaje de cobertura, seguido del IAF.

La mayor cantidad de biomasa seca de raíces se localizó en los primeros 30 cm de profundidad y en los primeros 75 cm a partir del centro de la cepa. A 60 cm de profundidad, se encontró 83.5, 84.4, y 78.5% de materia seca de raíces para los cultivares MEX 69-290, MEX 79-431 y CP 72-2086 respectivamente, siendo esta, la profundidad efectiva de enraizamiento.

El modelo AquaCrop demostró ser una herramienta útil y confiable para predecir la biomasa de tallos en caña de azúcar, mostrando un desempeño que varió de muy bueno a excelente, con un índice de eficiencia ( $E$ )= 0.75, 0.90 y 0.70, coeficiente de determinación ( $r^2$ )= 0.89, 0.94 y 0.87 y raíz del error cuadrático medio (RMSE, por sus siglas en inglés)= 3.8, 4.6 y 6.3 t ha<sup>-1</sup> en ciclo plantilla y un  $E$ = 0.93, 0.87 y 0.78,  $r^2$ = 0.95, 0.91 y 0.95 y RMSE= 2.2, 2.3 y 2.3 t ha<sup>-1</sup> en el ciclo soca, para los cultivares MEX 69-290, MEX 79-431 y CP 72-2086, respectivamente.

## 7. LITERATURA CITADA

- Abreu, M. L., M. A. Silva, I. Teodoro, L. A. De Holanda e G. D. S. Neto. 2013. Crescimento e produtividade de cana-de-açúcar em função da disponibilidade hídrica dos Tabuleiros Costeiros de Alagoas. B. Campinas. 72 (3):262-270.
- Aguilar N., G. Galindo, J. Fortanelli y C. Contreras. 2010. Índice normalizado de vegetación en caña de azúcar en la Huasteca Potosina. Av. en Inv. Agrop. 14(2):49-65.
- Alencar, L. P. 2014. Parametrização e validação do modelo AquaCrop para a cultura da cana-de-açúcar. Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia

- Agrícola. Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola. Brasil. 117 p.  
<https://www.locus.ufv.br/bitstream/123456789/8211/1/texto%20completo.pdf>.
- Allison, J.C.S., N.W. Pammenter and R.J. Haslam. 2007. Why does sugarcane (*Saccharum* sp. hybrid) grow slowly?. *S Afr J Bot.* 73:546–551.
- Almeida, T. I. R., C. R. De Souza and R. Rossetto. 2006. ASTER and Landsat ETM+ images applied to sugarcane yield forecast. *I. J. of R. Sensing.* 27:4057-4069.
- Arévalo R. A., E. I. Bertoncini, E. M. Aranda y T. A. González. 2011. Alelopatía en *Saccharum* spp. (caña de azúcar). *Av. en Inv. Agrop.* 15(1):51-60.
- Arreola-Enríquez, J., E. Saucedo-Novelo, E. Carrillo-Ávila, J.J. Obrador-Olan, A. Valdez-Balero y D. A. Leyva-Trinidad. 2019. Evaluación de variedades de caña de azúcar (*Saccharum* spp.) introducidas al estado de Quintana Roo, México. *AP.* 12(7):57-63.
- Augustine, D.J., D.T. Booth, S.E. Cox, and J.D. Derner. 2012. Grazing intensity and spatial heterogeneity in bare soil in a grazing-resistant grassland. *Rangeland Ecol. Manag.* 65:39–46.
- Baez-Gonzalez, A. D., J. R. Kiniry, M. N. Meki, J. Williams, M. Alvarez-Cilva, J. L. Ramos-Gonzalez, A. Magallanes-Estala and G. Zapata-Buenfil. 2017. Crop Parameters for Modeling Sugarcane under Rainfed Conditions in México. *J. Sustainability.* 9(8):13-37.
- Baez-Gonzalez, A. D., Kiniry, J. R., Meki, M. N., Williams, J. R., Alvarez Cilva, M., Ramos Gonzalez, J. L. and Magallanes Estala, A. 2018. Potential impact of future climate change on sugarcane under dryland conditions in Mexico. *J. of Agron. and Crop Sci.* 204(5):515-52.

- Bahmani, O. and S. Eghbalian. 2018. Simulating the Response of Sugarcane Production to Water Deficit Irrigation Using the AquaCrop Model. *Agric Res.* 7(2):158–166. <https://doi.org/10.1007/s40003-018-0311-0>.
- Baquero, J. E., R. Ralisch, C. C. Medina, J. Tavares F. and M. F. Guimarães. 2012. Soil physical properties and sugarcane root growth in a red oxisol. *R. Bras. Ci. Solo.* 36:63-70.
- Barbieri, V. 1993. Condicionamento climático da produtividade potencial da cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*): um modelo matemático-fisiológico de estimativa. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 142 p.
- Barbieri, V., F. C. Da Silva e C. G. H. Dias-Ambrona. 2010. Modelagem de Cana de Açúcar para Previsão de Produtividade de Canaviais no Brasil e na Austrália. *In: 39, JAIIO-CAI.* ISSN:1852-4850. pp 745-762.
- 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. *I. Sugarcane J.* 104:10-13.
- Bedane, T. T. 2018. Validation of FAO-FRAME remote sensing based agricultural water productivity estimates in the upper awash river basin, Ethiopia. Thesis of Master Science, Faculty of Geo-Information Science and Earth Observation of the university of Twente. Enschede, The Netherlands. 58 p.
- Begue, A., V. Lebourgeois, E. Bappel, P. Todoroff, A. Pellegrino, F. Baillarin, and B. Siegmund. 2010. Spatio-temporal variability of sugarcane fields and recommendations for yield forecast using NDVI. *I. J. of R. Sensing, T. Francis.* 31(20):5391-5407.

- Benincasa, M. M. P. 2003. Análise de Crescimento de Plantas: Noções Básicas. FUNEP, Jaboticabal. 42 p.
- Bernardes, M. S., C. Suguitani, P. R. Laclau, J. F. Martiné and L. Chopart. 2007. Evaluation of Mosicas sugarcane growth model in Brasil. In 26th Congress of the International Society of Sugar Cane Technologists. 26:589-592.
- Blackburn, F. 1984. Sugarcane. New York: Longman. 414p.
- Blanco M. A., J. Borroto, J. L. Golles, Y. Capdesuñer, A. Cervantes, S. Rodríguez, M. Rivas y H. Peralta. 2003. Dinámica del crecimiento y desarrollo de cuatro variedades de caña de azúcar (*Saccharum sp.*): aspectos fisiológicos y azucareros. Cult. Trop. 24(1):47-54.
- Booth, D. T., S. E. Cox and R. D. Berryman. 2006. Point sampling digital imagery with “SamplePoint”. Environ. Monit. Assess. 123:97–108.
- Bravo-Mosqueda E., A. D. Báez-González, C.A. Tinoco-Alfaro, V. Mariles-Flores y E. Osuna-Ceja. 2014. Análisis de brecha de rendimiento de un área homogénea y zonificación de una región de ingenio azucarero en Oaxaca, México. J. Crop Improv. 28:772–794.
- 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. Ind. y Agric. de Tucumán. 84:29-32.
- Brown, M. E. and K. De Beurs. 2008. Evaluation of multi-sensor semi-arid crop season parameters based on NDVI and rainfall. Rem. Sensing of Env. 112:2261–2271.
- 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. Cult. Trop. 31:93-100.
- Cañeros (Unión Nacional de Cañeros A.C.). 2020. Estadísticas de la agroindustria. [www.http://caneros.org.mx/estadistica-actual/](http://caneros.org.mx/estadistica-actual/). Consultado el 22 de junio de 2020.

- Casagrande, A. A. Tópicos de Morfologia e Fisiologia da Cana-de-Açúcar. Jaboticabal: Funep. 1991. 157p.
- Clemente, P. R. A., V. S. G. Da Silva, V. M. Ferreira, J. V. Silva, G. V. De S. Barbosa and L. Endres. 2018. Nutritional status and technological quality of sugarcane due to increasing gypsum doses. AJCS. 12(09):1504-1511.
- Córdova-Gamas, G., S. Salgado-García, M. Castelán-Estrada, D.J. Palma-López, E. García-Moya, L.C. Lagunes-Espinoza y S. Córdova-Sánchez. 2016. Opciones de fertilización para el cultivo de caña de azúcar (*Saccharum* sp.) en Tabasco, México. AP. 9(3):27-34.
- Cortés B., C.A., J.G. Bernal P., E.D. Díaz A. y J. F. Méndez M. 2013. Uso del Modelo Aquacrop para Estimar Rendimientos para el Cultivo de Caña de Azúcar en el Departamento del Valle del Cauca. Relatório Técnico FAO. 55p. Disponible en: <http://www.fao.org/docrep/field/009/i3427s/i3427s.pdf>. Consultado el 16 de octubre del 2019.
- Cuanalo C., H. 1981. Manual de Descripción de Perfiles de Suelo en el Campo. 2ª ed. Colegio de Postgraduados. Chapingo, México. 40 pp.
- De Oliveira, R. A., E. Daros, J. L. Camargo Z., H. Weber, O. Teruyo I., J. C. Bespalhok-Filho, K. C. Zuffellato-Ribas e D. K. Tramujas 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 Oliveira, C. A. E., R. I. De Oliveira, B. M. T. De Andrade, F. J. Freire, M. A. Lira J. & P. R. Machado. 2010. Crescimento e acúmulo de matéria seca em variedades de cana-de-açúcar cultivadas sob irrigação plena. R. Bras. Eng. Agríc. Amb. 14(9):951-960.

- De Oliveira, R. A., E. Daros, J.L. C. Zambon, H. S Koehler, e D.K. T. Silva. 2005. Crescimento e desenvolvimento de três cultivares de cana-de-açúcar, em cana-planta, no estado do Paraná: taxas de crescimento. Sc. Agrária. 6(1-2):85-89.
- Do Amaral, L. R. e J. P. Molin. 2011. Sensor óptico no auxílio à recomendação de adubação nitrogenada em cana de acucar. Pesq. agropec. Bras. 46(12):1633-1642.
- Espinosa S., J.O., S. Salgado G., S. Córdova S., M. Castelán E., N.J. Rodríguez V. y R.G. Santos A. 2016. Diagnóstico nutricional de once variedades de caña de azúcar (*Saccharum spp.*) en el Ingenio Azsuremex Tenosique, Tabasco. AP. 9(3):54-59.
- FAO. (2019). Food Balance Sheets Retrieved from <http://www.fao.org/faostat/en/#data/FBS>. Retrieved 08.02.2019, from Food and Agricultural Organization <http://www.fao.org/faostat/en/#data/FBS>.
- Farahani, H. J., G. Izzi and T. Y. Oweis. 2009. Parameterization and Evaluation of AquaCrop for Full and Deficit Irrigated Cotton. Agron. J. 101(3):469-476.
- Faroni, C. E. 2004. Sistema radicular de cana-de-açúcar e identificação de raízes metabolicamente ativas. Dissertação (Mestrado), Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba. 68p.
- Faroni, C. E. e P. C. O. Trivelin. 2006. Quantificação de raízes metabolicamente ativas de cana-de-açúcar. Pesq. agropec. bras. 41(6):1007-1013.
- Fourcaud, T.; Zhang, X.; Stokes, A.; Lambers, H. and Körner, C. 2008. Plant growth modelling and applications: The increasing importance of plant architecture in growth models. A. of Bot. 101 (8):1053-1063.

- Frasson, F.R., Molin, J.P., Povh, P. F. and Salvi, J.V. 2007. Temporal behavior of NDVI measured with an active optical sensor for different varieties of sugarcane. *BioEng. Campinas.* 1(3):237-244.
- Freire, F. J., E. C. De Oliveira A., M. B. G. Dos Santos F., R. I. De Oliveira and A. De Oliveira C. 2010. Growth Indices of Eleven Sugarcane Varieties Grown Under Full Irrigation Environments in Brazil. *In: 19th World Congress of Soil Science, Soil Solutions for a Changing World 1 – 6 August 2010, Brisbane, Australia.* Disponible en <https://www.iuss.org/19th%20WCSS/Symposium/pdf/1600.pdf>.
- García Y., A. Vega y R. Castro. 2018. Efecto de dos sistemas de cosecha de la caña de azúcar sobre la calidad del suelo en Cantón Milagro, Ecuador. *A. Agríc. y Pec.* 4(2):60-68.
- Gava, G. J. De C., P.C. O. Trivelin, M.W. De Oliveira e C. P. Penatti. 2001. Crescimento e acúmulo de nitrogênio em cana-de-açúcar cultivada em solo coberto com palhada. *Pesq. agropec. bras.* 36(11):1347-1354.
- Hermann, E. R. e G.M. S. Câmara. 1999. Um método simple para estimar a área foliar de cana-de-açúcar. *Rev. STAB, Piracicaba.* 17:32-34.
- Hopkins, W. G. and N. P. A. Hüne. 2004. *Introduction to Plant Physiology. Third Edition.* John Wiley & Sons, Inc. USA. pp. 45-61.
- Hunt, R. 1990. *Basic Growth Analysis.* Published by the academic Division of Unwin Hyman Ltd. London, 110 p.
- Hunt, R., D. R. Causton, B. Shipley and A. P. Askew. 2002. A modern tool for classical plant growth analysis. *A. of Bot.* 90:485-488.

- Islam, M. S., M. A. S. Miah, M. K. Begum, M. R. Alam and M. S. Arefin. 2011. Growth, yield and juice quality of some selected sugarcane clones under, water-logging stress condition. *World J. Agric. Sci.* 7 (4):504-509.
- Iuss Grupo de Trabajo WRB. 2007. Base Referencial Mundial del Recurso Suelo. Primera actualización. Informes sobre Recursos Mundiales de Suelos No. 103. Fao, Roma. 117 p.
- Izquierdo-Hernández, J., S. Salgado-García, L. C. Lagunes-Espinoza, D. J. Palma-López, H. Ortiz-Laurel, S. Córdova-Sánchez and M. Castelán-Estrada. 2016. Nutritional and Physiological Response of Sugarcane Varieties to Nitrogen Fertilization in a Haplic Cambisol. *S. Tech.* 18(5):493–499.
- Jackson, R. D. and R. A. Huete. 1991. Interpreting vegetation indices. *Prev. V. Medicine.* 11(1):185-200.
- Jones, B. J., B. Wolf, H. A. Mills. 1991. *Plant Analysis Handbook: A Practical Sampling, Preparation, Analysis and Interpretation Guide.* Micro-Macro publishing Inc. Athens, Georgia, USA. 213 p.
- Jones, C. A., M. K. Wegener, J. S. Russel, I. M. Mcleod and J. R. Williams. 1988. *AUSCANE—Simulation of Australian Sugarcane with EPIC.* Brisbane: Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization. 194 p.
- Jurecka, F., P. Hlavinka, L. Vojtech, M. Trnka and Z. Zalud. 2016. Crop yield estimation in the field level using vegetation indices. *Mendelnet.* Pp. 90-95. Disponible en <https://mendelnet.cz/pdfs/mnt/2016/01/14.pdf>
- Karcher, D. E., and M. D. Richardson. 2005. Batch analysis of digital images to evaluate turfgrass characteristics. *Crop Sci.* 45:1536–1539.

- Keating, B. A., P. S. Carberry, G. L. Hammer, M. E. Probert, M. J. Robertson, D. Holzworth, and G. McLean. 2003. An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation. *E. J. of agronomy*. 18(3):267-288.
- Keating, B. A., M. J. Robertson, R. C. Muchow and N. I. Huth. 1999. Modelling sugarcane production systems. Development and performance of the sugarcane module. *Field Crops Res.* 61:253-271.
- Korhonen, L., K. T. Korhonen, M. Rautiainen, and P. Stenberg. 2006. Estimation of forest canopy cover: A comparison of field measurement techniques. *Silva Fenn.* 40:577–588.
- Körner, C. 2015. Paradigm shift in plant growth control. *Plant Biol.* 25:107-114.
- Kunz, R., R. Schulze, T. Mabhaudhi and O. Mokonoto. 2014. Modelling the potential impacts of climate change on yield and water use of sugarcane and sugar beet: preliminary results based on the AquaCrop model. *Proc S Afr Sug Technol Ass.* 87:285–289.
- Larcher, W. e C. H. B. Prado A. 2000. *Ecofisiologia Vegetal*. São Carlos: Rima Artes e Textos. 531 p.
- Liang, L., M. D. Schwartz, and S. Fei. 2012. Photographic assessment of temperate forest understory phenology in relation to springtime meteorological drivers. *Int. J. Biometeorol.* 56:343–355.
- Lisboa, P. I., J. M. Damian, M. R. Cherubin, P. P. S. Barros, P. R. Fiorio, C. C. Cerri and C. E. Pellegrino C. 2018. Prediction of sugarcane yield based on NDVI and concentration of leaf-tissue nutrients in fields managed with straw removal. *Agron.* 8 (196):1-21.
- Liu, D. L. and G. Kingston. 1995. Qcane: A Simulation Model of Sugarcane Growth and Sugar Accumulation. *In: Robertson, M. J. (Ed.). Research and Modelling Approaches to Assess*

- Sugarcane Production Opportunities and Constrains. St. Lucia: University of Queensland, 1995. pp. 25-29.
- Liu, W. T. H. 2007. Aplicações de sensoriamento remoto. Campo Grande: Uniderp. 908 p.
- Lizcano T., R., D. Olivera V., D. Saavedra M., L. Machado C., E. R. Valencia, M. F. Moreno P. y M. F. Flórez. 2017. Muestreo de Suelos, Técnicas de Laboratorio e Interpretación de Análisis de Suelos. Centro de Formación Agroindustrial La Angostura-Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA). Huila, Colombia. 88 p.
- Lofton, J., B. S. Tubana, Y. Kanke, J. Teboh, H. Viator and M. Dalen. 2012. Estimating sugarcane yield potential using an in-season determination of normalized difference vegetative index. *Sensors*. 12:7529-7547.
- Mabhaudhi, T., A. T. Modi, Y. G. Beletse. 2014. Parameterization and evaluation of the FAO-AquaCrop model for a South African taro (*Colocasia esculenta* L. Schott) landrace. *Agric For Meteorol*. 192–193:132–139.
- Machado, E. C., A.R. Pereira, M.B. P. Camargo, J.I. Fahl. 1985. Relações radiométricas de uma cultura de cana-de-açúcar. *B. Campinas*. 44:229-238.
- Magalhães, A. C. N. 1985. Análise Quantitativa do Crescimento. *In*: Ferri, M. G. *Fisiologia Vegetal*. 2. ed. São Paulo: Editoras EPU; EDUSP. Volumen 1. 350 p.
- Marafon, A. C. 2012. Análise Quantitativa de Crescimento em Cana-de-Açúcar: Uma Introdução ao Procedimento Prático. Embrapa Tabuleiros Costeiros. 29 p. Disponible en [http://www.cpatc.embrapa.br/publicacoes\\_2012/doc\\_168.pdf](http://www.cpatc.embrapa.br/publicacoes_2012/doc_168.pdf).
- Marasca I., R. Barbosa D. S., M. M. Pereira S., A. Paz G. y K. Pereira L. 2015. Morfología de la caña de azúcar en la preparación profunda del suelo en canteros. *IDESIA*. 33 (4):23-29.

- Marin, F.R. and J.W. Jones. 2014. Process-based simple model for simulating sugarcane growth and production. *Sc. Agric. Piracicaba*. 71:1-17.
- Marin, F.R., J.W. Jones and K. J. Boote. 2017. A Stochastic method for crop models: Including uncertainty in a sugarcane model. *Agron. J.* 109(2):1-13.
- Marin F. R., M. A. Moreno, A. Farías, F. Villegas, J. M. Rodríguez B. y M. Van den Berg. 2018. Modelación de la Caña de Azúcar en Latinoamérica: Estado del Arte y Base de Datos para Parametrización. EUR 29018 ES, Oficina de Publicaciones de la Unión Europea, Luxemburgo, 57 p. doi:10.2760/247719.
- Marin, F. R., P. Thorburn, D. S. P. Nassif and L. G. Costa. 2015. Sugarcane model intercomparison: Structural differences and uncertainties under current and potential future climates. *Env. Mod. and Soft.* 1:1-2.
- 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 (CENGICANÑA). Guatemala. 512 p.
- Meyer, G. E., and J. C. Neto. 2008. Verification of color vegetation indices for automated crop imaging applications. *Comput. Electron. Agric.* 63:282–293.
- 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. R. de divulgación, División Académica de Ciencias Biológicas –UJAT. 5:1-8.
- Molijn, A. R., L. Iannini1, J. Vieira R. and R. F. Hanssen 2018. Data Descriptor: Ground reference data for sugarcane biomass estimation in São Paulo state, Brazil. *Sci. Data*. 5:1-17.

- Molnar P. 2011. Calibration. Watershed Modelling, SS. 2011. Institute of environmental Engineering, Chair of Hydrology and Water Resources Management, ETH Zürich. Switzerland.
- Moran, R. 1982. Formule for determination of chlorophyll pigments extracted with N.N-dimethylformamide. *Plant Physiol.* 69:1376-1381.
- Moreto, B. V. 2019. Modelagem para auxiliar na otimização do sistema “climate-smart-agriculture” para cultivo de cana-de-açúcar. Tese doutorado. Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Campus de Jaboticabal. 96 p.
- Nash, J. E., and J. V. Stuchliffe. 1970. River flow forecasting through conceptual models. I. A discussion of principles. *J. of Hydrol.* 10:282-290.
- Nassif, D. S. P., F. R. Marin, R. Rezende, e G. Q. Pellegrino. 2012. Parametrização e avaliação do modelo DSSAT/Canegro para variedades brasileiras de cana-de-açúcar. *Pesq Agrop. Brasileira.* 47:311-318.
- Neto, D. J., J. L. Figueredo Da C., C. H. Farias De A., H. M. De Azevedo e C. A. V. De Azevedo. 2006. Resposta da cana-de-açúcar, primeira soca, a níveis de irrigação e adubação de cobertura. *R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental.* 10 (2):283–288.
- Nielsen, D. C., J. J. Miceli-Garcia, and D. J. Lyon. 2012. Canopy cover and leaf area index relationships for wheat, triticale, and corn. *Agron. J.* 104:1569–1573.
- NOM-021-RECNAT. 2001. Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis. SEMARNAT. MEXICO. 88 p.
- O’Leary, G. J. 2000. A review of three sugarcane simulation models with respect to their prediction of sucrose yield. *F. Crops Res.* 68:97-111.

- Ohashi, P. A. Y., R. C. M. Pires, R. V. Ribeiro and A. L. B. O. Silva. 2015. Root growth and distribution in sugarcane cultivars fertigated by a subsurface drip system. *B. Campinas.* 74(2):131-138.
- Oliveira, R. A., E. Daros, J. L. C. Zambon, H. Weber, O. T. Ido, K. C. Zufellato-Ribas, H. S. Koehler, D. K. T. Silva. 2007. Área foliar em três cultivares de cana-de-açúcar e sua correlação com a produção de biomassa. *Pesq. Agrop. Trop.* 37(2):71-76.
- Otto, R., A. P. Silva, H. C. J. Franco, E. C. A. Oliveira and P. C. O. Trivelin. 2011. High soil penetration resistance reduces sugarcane root system development. *S. and Tillage Res.* 117:201-210.
- Otto, R., H. C. Junqueira F., C. E. Faroni and A. C. Vitti, E. C. A. De Oliveira, R. A. Sermarini and P. C. O. Trivelin. 2014. The role of nitrogen fertilizers in sugarcane root biomass under field conditions. *Agric. Sci.* 5:1527-1538.
- Otto, R., P. C. O. Trivelin, H. C. Junqueira F., C. E. Faroni and A. C. Vitti. 2009. Root system distribution of sugar cane as related to nitrogen fertilization, evaluated by two methods: monolith and probes. *R. Brasileira de C. do Solo.* 33:601-611.
- Pagani, V., T. Stella, T. Guarneri, G. Finotto, M. Van Den Berg, F.R. Marin, M. Acutis and R. Confalonieri. 2017. Forecasting sugarcane yields using agro-climatic indicators and Canegro model: A case study in the main production region in Brazil. *Agric. Systems* 154:45-52.
- 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. México. 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*. 20(3):347-358.
- Paruelo, J. M., W. K. Lauenroth, and P. A. Roset. 2000. Technical note: Estimating aboveground plant biomass using a photo-graphic technique. *J. Range Manage.* 53:190–193.
- Patrignani, A, and T. E. Ochsner. 2015. Canopeo: A Powerful New Tool for Measuring Fractional Green Canopy Cover. *Agron. J.* 107(6):2312-2320.
- Pereira, L. F.M., Ferreira, M. V., De Oliveira, G. N., Sarmento, L.V.S. P., Endres, L. and Teodoro I. 2017. Sugars levels of four sugarcane genotypes in different stem portions during the maturation phase. *An Acad Bras Cienc.* 89(2):1232-1242.
- Pereira, M. R. D. Casaroli, L. M. Vellame, J. Alves J., A. W. Pêgo E. 2016. Sugarcane leaf area estimate obtained from the corrected normalized difference vegetation index (NDVI). *Pesq. Agropec. Trop., Goiânia.* 46(2):140-148.
- 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.
- Poorter, H. and Sack, L. 2012. Pitfalls and possibilities in the analysis of biomass allocation patterns in plants. *Front. in Plant Sci.* 3(259):1-10.
- Prezotti, L. C. e A. Guarçoni M. 2013. Guia de Interpretação de Análise de Solo e Foliar. Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural. Vitória, Espírito Santo, Brasil. 104 p.
- Purcell, L.C. 2000. Soybean canopy coverage and light interception measurements using digital imagery. *Crop Sci.* 40:834–837.

- Radhamani, R., R. Kannan and P. Rakkiyappan. 2016. Leaf chlorophyll meter readings as an indicator for sugarcane yield under iron deficient typic haplustert. *S. Tech.* 18(1):61–66.
- Raes D, Steduto P, Hsiao TC, Fereres E (2012). *AquaCrop Version 4.0 Reference Manual*. Rome, Italia. FAO. Disponible en [http://www.fao.org/nr/water/infores\\_databases\\_aquacrop.html](http://www.fao.org/nr/water/infores_databases_aquacrop.html).
- Raes, D., P. Steduto, T.C. Hsiao, and E. Fereres. 2009. AquaCrop-The FAO crop model to simulate yield response to water: II. Main algorithms and software description. *Agron. J.* 101:438–447.
- Rasmussen, J., H. Mathiasen, and B.M. Bibby. 2010. Timing of post-emergence weed harrowing. *Weed Res.* 50:436–446.
- 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: Azcon, J. y M. Talón. (eds.): Fundamentos de Fisiología Vegetal*. McGraw-Hill México. Pp 131-153.
- Rodríguez, M. J. N., A. Muñoz O., J. A. Cuevas S., L. Córdova T., C. H. Bortoni T. y H. López N. 2015. Sequía e interacción sequía\*barrenador en la caña de azúcar durante la etapa vegetativa. *R. Mex. de C. Agríc.* 6(5):1013-1022.
- Rodríguez, G. R., Y. Puchades I., W. Abiche M., S. Rill M., H. J. Suarez, Y. Salmón C. y G. Gálvez. 2015. Estudio del rendimiento y modelación del período de madurez en nuevos cultivares de caña de azúcar. *Cult. Trop.* 36(4):134-143.

- Rodríguez-Gross, R., Y. Puchades-Isaguirre, N. Bernal-Liranza, H. Jorge-Suárez y H. García-Pérez. 2011. Estudio del sistema radicular en 11 genotipos de caña de azúcar en diferentes tipos de suelos. C. en su PC. 4:58-70.
- Romero E., R., P. A. Dignonzelli y J. Scandaliaris. 2009. Manual del Cañero. Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres, Tucumán Argentina. 232 p.
- Romero I. J., R. Correa, F. A. Sosa, Ca. Sotomayor, M. Morandini, N. Aranda y G. A. Sanzano. 2015. Estudios del sistema radicular de la caña de azúcar en Tucumán. Método de la pared de perfil. Av. Agroind. 36 (1): 14-20.
- Rosa, A. H. J., L. R. Do Amaral, J. P. Molin and H. Cantarella. 2015. Sugarcane response to nitrogen rates, measured by a canopy reflectance sensor. Pesq. agropec. 50(9):840-848.
- Rosas J., A. A., M. E. Galindo T., H. E. Lee E. y O. G. Alvarado G. 2010. Variabilidad genética en 22 variedades híbridas de caña de azúcar (*Saccharum* spp. Híbrido). *PHYTON* 79:87-94.
- Rudorff, B. F. T., D. Alves D. A., W. F. Da Silva, L. M. Sugawara, M. Adami and M. Alves M. 2010. Studies on the rapid expansion of sugarcane for ethanol production in São Paulo State (Brazil) using Landsat data. *R. Sensing*. 2(4):1057-1076.
- Rueda C., F., L. A. Peñaranda M., W. L. Velásquez V. y S. A. Díaz B. 2015. Aplicación de una metodología de análisis de datos obtenidos por percepción remota orientados a la estimación de la productividad de caña para panela al cuantificar el NDVI (índice de vegetación de diferencia normalizada). *Corpoica Cienc. Tecnol. Agropecu.* 16(1):25-40.
- 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.
- Salgado G., S. 2011. Cambio climático global: un proceso natural o antrópico. *R. ATAM.* 22:30-34.

- Salgado G., S., D. J Palma-López., 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 G., S., D. J. Palma-López., 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 G., S., J. Izquierdo H., L. del C. Lagunes E., D. J Palma-López., S. Córdoba S., H. Ortiz L., y M. Castelán E. 2017. Consumo de nitrógeno por cultivares de caña de azúcar en Tabasco, México. Rev. FCA UNCUIYO 49(1):45-59.
- 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. Texcoco, Estado de México. México. 524 p.
- Salgado G., S., R. Nuñez E., J. J. Peña C., J. D. Etchevers, D. J. Palma L. y R. M. Soto. 2003. Manejo de la fertilización en el rendimiento, calidad del jugo y actividad de invertasas en caña de azúcar. Interciencia. 28(10):476-480.
- Salgado G., S., D. J. Palma-López, L. C. Lagunes-Espinoza, C. F. Ortiz-García y J. M. Ascencio R. 2005. Bases para generar un programa sustentable de fertilización en un ingenio de Tabasco, México. Interciencia. 30(7):395-403.

- Salgado-García S., E. M. Aranda-Ibañez, M. Castelán-Estrada, H. Ortiz-Laurel, D. J. Palma-López y S. Córdova-Sánchez. 2014a. Qué hacer con la paja de la cosecha mecanizada de la caña de azúcar. AP 7(2):3-7.
- Salgado-García S., D. J. Palma-López, M. Castelán-Estrada, L.nC. Lagunes-Espinoza y H. Ortiz L. 2013. Manual para Muestreo de Suelos, Plantas y Aguas e Interpretación de Análisis para la Producción Sostenible de Alimentos. Colegio de postgraduados-Campus Tabasco. H. Cárdenas, Tabasco, México, 101 p.
- Salgado-García S., M. Castelán-Estrada, E. M. Aranda-Ibañez, C. F. Ortiz-García, H. Ortiz-Laurel, L. C. Lagunes-Espinoza, J. H. R. Mendoza-Hernández y S. Córdova-Sánchez. 2014b. Validación de dosis generadas por el sistema de fertilización SIRDF para caña de azúcar (*Saccharum officinarum*). AP. 7(2):47-54.
- Salgado-García S., M. Castelán-Estrada, E. M. Aranda-Ibañez, H. Ortiz-Laurel, L. C. Lagunes-Espinoza y S. Córdova-Sánchez. 2016. Calidad de jugos de caña de azúcar (*Saccharum spp.*) según el ciclo de cultivo en Chiapas, México. AP. 9(7): 23-28.
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP), 2019. Anuario estadístico de la producción agrícola. Cierre de cultivos 2019: <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>.
- Sexton, J. and Y. Everingham. 2014. Global Sensitivity Analysis of Key Parameters in a Process-Based Sugarcane Growth Model—A Bayesian Approach. International Environmental Modelling and Software Society (IEMSS) 7th International Congress on Environment Modelling and Software, San Diego, California, USA, (Eds.): Daniel P. Ames, Nigel W.T. Quinn and Andrea E. Rizzoli. <http://www.iemss.org/society/index.php/iemss-2014-proceedings>.

- Sharma, B. and G. L. Ritchie. 2015. High-throughput phenotyping of cotton in multiple irrigation environments. *Crop Sci.* 55:958–969.
- 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.
- Silva, A. G. e C. Conti M. 2014. Produtividade e índices biométricos e fisiológicos de cana-de-açúcar cultivada sob diferentes quantidades de palhada. *Pesq. agropec. bras., Brasília.* 49(3):173-180.
- Silva, D. F. C. A., A. R. A. Da Silva, F. M. L. Bezerra, C. D.S. Ferreira e R. R. De Andrade. 2012a. Crescimento vegetativo da cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.) irrigada com água de esgoto doméstico tratado. *Conex. Ci. e Tecnol.* 6(1):27-43.
- Silva, T. G. F., M. S. B. Moura, S. Zolnier, J.F. A. Carmo e L. S. B. Souza. 2012b. Biometria da parte aérea da cana soca irrigada no submedio do vale do Sao Francisco. *Rev. Cienc. Agronomica.* 43(3):500-509.
- Silva-Olaya, A. M., C. E. Pellegrino C. e C. C. Cerri. 2017. Comparação de métodos de amostragem para avaliação do sistema radicular da cana-de-açúcar. *Rev. Cienc. Agr.* 34(1):3–12.
- Simões, M. D. S., J. V. Rocha, R. A. C. Lamparelli. 2005a. Growth indices and productivity in sugarcane. *Sci. Agric.* 62(1):23-30.
- Simões, M. D. S., J. V. Rocha, R. A. C. Lamparelli. 2005b. Spectral variables, growth analysis and yield of sugarcane. *Sci. Agric.* 62(3):199-207.
- Sinclair, T. R., R. A. Gilbert, R. E. Perdomo, J. M. Shine Junior, G. Powell and G. Montes. 2004. Sugarcane leaf area development under field conditions in Florida, USA. *F. Crops Res.* 88:171-178.

- Singels, A., M. Jones, and M. Van Der Berg. 2008. DSSAT v.4.5 DSSAT/CANEGRO: sugarcane plant module: scientific documentation. Mount Edgecombe: International Consortium for Sugarcane Modeling: S. African Sugarcane Res. Inst. 34p.
- Smit, M. A. and A. Singels. 2006. The response of sugarcane canopy development to water stress. F. Crops Res. 98:91-97.
- Smith, D. M.; N. G. Inman-Bamber and P. J. Thorburn. 2005. Growth and function of the sugarcane root system. F. Crops Res. 92:169-183.
- Stella, T., C. Francone, S. S. Yamaç, E. Ceotto, V. Pagani, R. Pilu and R. Confalonieri. 2015. Reimplementation and reuse of the Canegro model: From sugarcane to giant reed. Comp. and Electron. in Agric., 113:193-202.
- Subirós R., F. 1995. El Cultivo de la Caña de Azúcar. Edit. Universidad de Estatal a Distancia. San José de Costa Rica. 448 p.
- Suguitani, C. 2006. Entendendo o crescimento e produção da cana de açúcar: avaliação do modelo Mosicas. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.
- Taiz, L. and E. Zeiger. 2006. Plant Physiology. 4th ed: Sinauer Associates Inc. Publishers. Sunderland, Massachusetts. USA.690 p.
- Tavares, F. J., G. M. C. Barbosa, M. F. Guimarães e I. C. B. Fonseca. 2001. Resistência do solo à penetração and desenvolvimento radicular do milho (*Zea mays*) sob diferentes sistemas de manejo em Latossolo Roxo. R. Bras. Ci. Solo. 25:725-730.
- Teruel, D. A., V. Barbieri and L. A. Ferraro J. 1997. Sugarcane leaf area index modeling under different soil water conditions. Sci. Agric. 54:39-44.
- Thorp, K. R., and D. A. Dierig. 2011. Color image segmentation approach to monitor flowering in lesquerella. Ind. Crops Prod. 34:1150–1159.

- Toppa, E. V. B., C. J. Jadoski, A. Julianetti, T. Hulshof, E. O. Ono e J. D. Rodrigues. 2010. Physiology aspects of sugarcane production. *Pesq. Aplic. & Agrotecn.* 3(3):223-230.
- Torres V., I., F. Valladares A., J. Montalván D., Y. Fernández G., M. Padrón P. y A. Noy P. 2015. Comportamiento del área foliar específica en tres cultivares comerciales de caña de azúcar. *Agrisost.* 21(2):1-9.
- Ueno, M., Y. Kawamitsu, L. Sun, E. Taira and K. Maeda. 2005. Combined Applications of NIR, RS and GIS for Sustainable Sugarcane Production. *In Proceedings of the International Society of Sugar Cane Technologists (ISSCT), Guatemala, pp. 204-210.*
- 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.
- Vasconcelos, A. C. M., A. A. Casagrande, D. Perecin, L. A. C. Jorge & M. G. A. Landell. 2003. Avaliação do sistema radicular da cana-de-açúcar por diferentes métodos. *R. Bras. Ci. Solo.* 27:849-858.
- Vasconcelos, A. C. M. 2002. Desenvolvimento do sistema radicular e da parte aérea de socas de cana-de-açúcar sob dois sistemas de colheita. Tese Doutorado, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal. 140 p.
- Vázquez-Navarrete C., J. Izquierdo-Hernández y S. Salgado-García. 2019. Evaluación exploratoria del cultivo de la caña de azúcar (*Saccharum spp.*): Enfoque del paisaje del desempeño. *AP* 12(7):35-41.
- Villegas F., T. 2010. Sistema radical de la caña de azúcar. El sistema radical de las plantas y la absorción de nutrimentos. *Rev. Técnicaña.* 25:25-29.

- Villegas, F. D., O. H. Daza, J. W. Jones and F. S. Royce. 2005. CASUPRO: An Industry-Driven Sugarcane Model. *In: ASAE Annual International Meeting. Presented at the Transactions of American Society of Agricultural and Biological Engineers, Tampa.*
- Viveros V., C. A., D. Baena G., F. Salazar V., L. O. López y J. I. Victoria K. 2015. Características de la caña de azúcar asociadas con toneladas de caña por hectárea y sacarosa (% caña). *A. Agronómica.* 64(3):268–272.
- 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.
- Wiedefeld, P. R. 2000. Water stress during different sugarcane growth periods on yield and response to N fertilization. *Agricult. Water Manag.* 43:173-182.
- Wiegand, C. L., A. J. Richardson, D. E. Escobar, A. H. Gerbermann. 1991. Vegetation indices in crop assessments. *R. Sensing of Env.* 35(2-3):105-119.
- Willmott, C. J. 1982. Some comments on the evaluation of model performance. *Bull. of the American Meteorolo. Soc.* 63(11):1309-1313.
- Xavier, A. C., R. Vettorazzi e E. Machado. 2004. Relação entre índice de área foliar e frações de componentes puros do modelo linear de mistura espectral, usando imagens ETM+/Landsat. *Eng. Agríc.* 24 (2):421-430.
- Xiao, Z., X. Liao and S. Guo. 2017. Analysis of sugarcane juice quality indexes. *J. of Food Qual.* 2107:1-6. <https://doi.org/10.1155/2017/1746982>.
- Xie, G. H., W. Xiao Y., H. Dong Q. and X. Shuai. 2016. Harvest index and residue factor of non-cereal crops in China. *J. of China Agricult. Univers.* 16(1):9-17.

- Zanzarini, V. F., T. C. T. Pissarra<sup>1</sup>, F. J. C. Brandão e D. D. B. Teixeira. 2013. Correlação espacial do índice de vegetação (NDVI) de imagem Landsat/ETM+ com atributos do solo. *Eng. Agríc. Amb.* 17(6):608–614.
- 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 p.
- Zenteno C., G. A., E. Palacios V., L. Tijerina C. y H. Flores M. 2017. Aplicación de tecnologías de percepción remota para la estimación del rendimiento en caña de azúcar. *Rev. Mexicana de C. Agríc.* 8(7):1575-1586.
- Zerpa G., O. Sosa, J. Berardi, J. P. Bolatti, A. Galindo y J. Maldonado. 2013. La resistencia mecánica a la penetración en pasturas. *Agromensajes.* 35:64-68.