

Producción de biomasa e índices fisiológicos de cultivares de caña de azúcar en diferentes subunidades de suelos

Biomass production and physiological indices of sugarcane cultivars in different soil subunits

Manuel Sánchez-Jiménez¹ , Luz del C. Lagunes-Espinoza^{1*} , David J. Palma-López¹ , Samuel Córdova-Sánchez² , Rocío Acosta-Pech¹ , Sergio Salgado-Velázquez¹ 

¹Posgrado en Producción Agroalimentaria en el Trópico, Colegio de Posgraduados, Campus Tabasco, Periférico Carlos A. Molina s/n, 86500, Cárdenas, Tabasco, México.

²Universidad Popular de la Chontalpa, División Académica de Ingenierías y Ciencias Agropecuarias, Carretera Cárdenas-Huimanguillo, Km. 2.0, 86500, Cárdenas, Tabasco, México.

*Autor para correspondencia: lagunes@colpos.mx

RESUMEN

La producción de caña de azúcar se realiza en los campos aledaños a 49 ingenios azucareros, donde existe heterogeneidad de suelos a nivel parcelario, lo que podría afectar el potencial productivo de los cultivares establecidos. El objetivo de la presente investigación fue evaluar la acumulación de biomasa, el índice de área foliar (IAF) y el índice de vegetación de las diferencias normalizadas (NDVI) de los cultivares CP 72-2086 y Mex 69-290 en dos ciclos de cultivo y dos subunidades de suelo (Fluvisol eútrico, FLeu y Vertisol eútrico, VReu), y la relación de los índices con la biomasa y variables climáticas. Los resultados mostraron que la biomasa e IAF fueron afectados por el ciclo y por la subunidad de suelo asociada al cultivar. La resoca 1 presentó mayor número de tallos (NT), IAF y biomasa que la resoca 2. Por subunidad de suelo, CP 72-2086 presentó mayor NT e IAF en FLeu que Mex 69-290. La mayor biomasa de tallos de CP 72-2086 fue en FLeu, y de Mex 69-290 en VReu. Las correlaciones de Pearson fueron altas y significativas entre NDVI con IAF (0.61), y el IAF, con biomasa tallos (0.55), follaje (0.57) y total (0.66). Se concluye que el potencial productivo de un cultivar está asociado, además del efecto genotipo, al efecto de la subunidad de suelo, lo que debe de seguirse evaluando a nivel parcelario.

PALABRAS CLAVE

Saccharum, índice de área foliar, NDVI, número de tallos, biomasa tallos

ABSTRACT

Sugarcane production is carried out in the fields surrounding 49 sugar mills, where there is heterogeneity of soils at the parcel level, which affects the productive potential of established cultivars. The objective was to evaluate the biomass, the leaf area index (IAF) and the normalized difference vegetation index (NDVI) of the CP 72-2086 and Mex 69-290 cultivars in two cropping cycles and two soil subunits (Fluvisol eutric, FLeu and Vertisol eutric, VReu), and the relationship indexes with biomass and climatic variables. The results showed that biomass and LAI were affected by the cycle and by the soil subunit associated with the cultivar. Ratoon 1 presented higher number of stems (NT), LAI and biomass than ratoon 2 cycle. By soil subunit, CP 72-2086 presented a higher NT and IAF in FLeu than Mex 69-290. The highest stem biomass of CP 72-2086 was in FLeu, and of Mex 69-290 in VReu. Pearson's correlations were high and significant between NDVI with IAF (0.61); and the IAF, with stem (0.55), foliage (0.57) and total (0.66) biomass. It is concluded that the productive potential of a cultivar is associated, in addition to the genotype effect, to the effect of the soil subunit, which should continue to be evaluated at the plot level in other crop cycles.

KEYWORDS

Saccharum, leaf area index, NDVI, stem number, stem biomass

Fecha de recepción:

5 de junio de 2022

Fecha de aceptación:

14 de julio de 2023

Disponible en línea:

9 de julio de 2024

Este es un artículo en acceso abierto que se distribuye de acuerdo a los términos de la licencia Creative Commons.



Reconocimiento-

NoComercial-

CompartirIgual 4.0

Internacional

(CC BY-NC-SA 4.0)

INTRODUCCIÓN

La caña de azúcar es considerado el principal cultivo proveedor de azúcar en el mundo, y, en 2021, México ocupó el sexto lugar por área cosechada y producción, pero el trigésimo quinto lugar por rendimiento (68.18 t ha^{-1}). Durante la zafra 2020/2021 la caña de azúcar se cultivó en 789,996 ha a nivel nacional, de las cuales el estado de Tabasco aportó 38,568 ha, según la Unión Nacional de Cañeros (Cañeros 2021). Dos ingenios azucareros se ubican en la región de la Chontalpa, Tabasco: Presidente Benito Juárez y Santa Rosalía. El Ingenio Santa Rosalía (ISR), perteneciente al Grupo Beta San Miguel y ubicado en el municipio de Cárdenas, ha mejorado sus niveles de productividad al incrementar de 2006 a 2020 la superficie cultivada de 9,038 a 12,248 ha, y el rendimiento de 41.6 a 56.5 t ha^{-1} . Aunque el incremento en rendimiento ha mejorado, aún es inferior a la media nacional obtenida en la zafra 2020/2021, que fue de 64.9 t ha^{-1} (Cañeros 2021). Los principales cultivares en el área de abastecimiento del ISR son Mex 69-290 y CP 72-2086, los cuales se encuentran establecidos en diferentes condiciones edáficas.

Para mejorar la productividad de los cultivares de caña de azúcar establecidos en el estado, se han determinado dosis de fertilización por unidad de suelo, y puesto a disposición de los agricultores (Salgado-García et al. 2005; Salgado-García et al. 2013). Estos estudios se han enfocado principalmente en las características edáficas de los principales tipos de suelos y el rendimiento del cultivo, sin detallar la dinámica de crecimiento del cultivo de caña ni el comparativo de rendimiento de una misma variedad en diferentes subunidades de suelo dentro de un área de abastecimiento.

Recientemente se ha demostrado que el área de abastecimiento de un ingenio presenta heterogeneidad en tipos de suelos, por lo que se deben hacer recomendaciones de fertilización y manejo de sitio específicas por cultivar (Salgado-Velázquez et al. 2020). A nivel de cultivar será necesario evaluar, en el tiempo y por ciclo de cultivo (plantilla, soca, resoca), la acumulación y distribución de biomasa, y parámetros como el índice de área foliar y el Índice de Vegetación de las Diferencias Normalizadas (NDVI), relacionados con la acumulación de biomasa (Simões et al. 2005a; Zenteno et al. 2017). La información espectral del cultivo puede también ayudar a conocer la relación entre

ésta y el rendimiento, así como el efecto de las condiciones ambientales presentes durante el desarrollo del cultivo, secuela que podría acentuarse por el cambio climático (Mauri et al. 2017; Zhao y Li 2015).

Además, los estudios de dinámicas del crecimiento de la caña de azúcar permiten conocer los cambios que experimenta el cultivo durante su desarrollo en respuesta a las diferentes condiciones agroclimáticas y ciclos de producción, y son la base para modelar esta respuesta y predecir el rendimiento (Rudorff y Batista 1990). Entre las variables fisiológicas que deben incluirse por su relación con la acumulación de biomasa y el rendimiento están el índice de área foliar, el NDVI y las tasas de crecimiento (Simões et al. 2005a).

El presente estudio es una primera aproximación al complejo sistema suelo-planta-clima-sitio específico dentro de un área de abastecimiento de un ingenio (en este caso, del ISR), y permitiría proveer información más detallada sobre la respuesta en la acumulación y distribución de biomasa de un cultivar de acuerdo con el ambiente específico donde se cultive, incluyendo su respuesta en el tiempo a través de los ciclos de cultivo. El objetivo fue evaluar la producción y distribución de biomasa aérea e índices fisiológicos (índice de área foliar y NDVI), y la relación de los índices con la acumulación de biomasa y variables climáticas, en dos ciclos de producción (resoca 1 y resoca 2) de los cultivares Mex 69-290 y CP 72-2086, en dos subunidades de suelo del área de abastecimiento del Ingenio Santa Rosalía, en la Chontalpa, Tabasco, México.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitios de estudio

El presente estudio se llevó a cabo en el área de abastecimiento del ISR (Figura 1), ubicado en la región de la Chontalpa, Tabasco, México, durante el ciclo resoca 1 y resoca 2 del cultivo de caña de azúcar, que corresponde a la zafra diciembre 2019-junio 2021.

Toma de muestras

Dentro del área de abastecimiento del ISR se ubicaron 4 parcelas cultivadas con los cultivares CP 72-2086 y

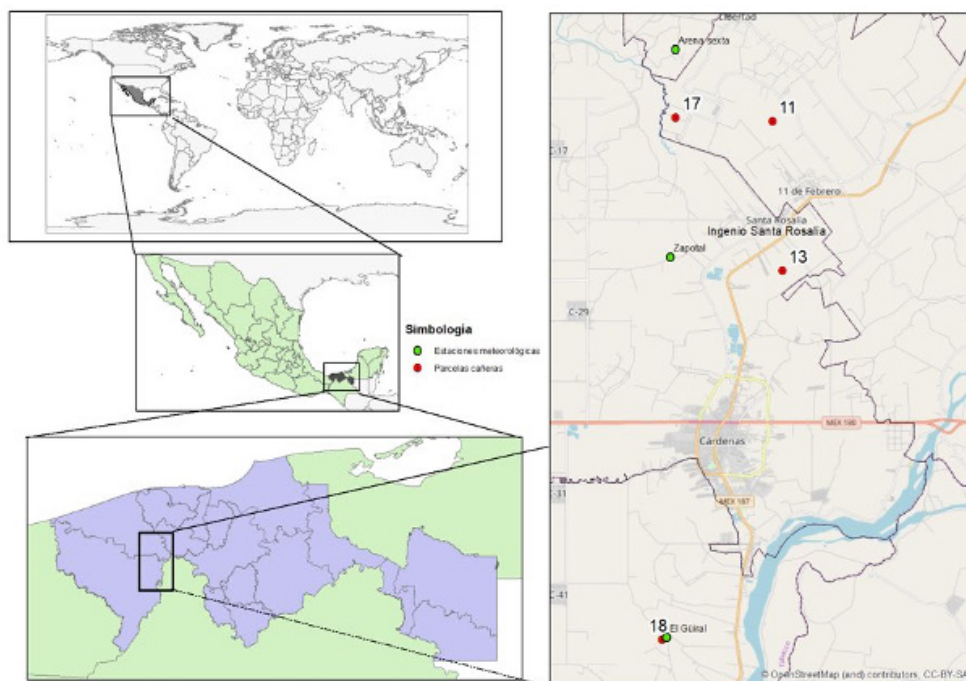


Figura 1. Ubicación espacial del Ingenio Santa Rosalía, sitios en estudio (en número) y estaciones meteorológicas (círculos color verde), en la región de la Chontalpa, Tabasco, México.

Mex 69-290, establecidos en las subunidades de suelo Fluvisol eútrico (FLeu) y Vertisol étrico (VReu) (Cuadro 1).

Dentro de cada parcela, se ubicó un área de 1.0 ha, en la cual se marcaron cinco subparcelas de 30 x 30 m dejando una separación de 10 m entre cada una. La toma de datos y de muestras se realizó en dos metros lineales dentro de cada subparcela, evitando el efecto de borde. Estos dos metros lineales se desplazaron al segundo surco inmediato siguiente cada mes, para mantener el efecto de competencia. Cada subparcela fue considerada una repetición. El experimento se estableció bajo el esquema de un diseño anidado cruzado de efectos fijos, con cinco repeticiones; los factores de interés fueron subunidad de suelo (FLeu y VReu),

ciclo de cultivo (resoca 1 y resoca 2), así como variedad de caña. Cada parcela se definió como la unidad experimental.

Manejo agronómico

Se realizó de acuerdo con el paquete tecnológico del Ingenio Santa Rosalía (ISR), que incluye las dosis de fertilización (Cuadro 1) generadas por el estudio de Salgado-García et al. (2005), y el manejo de malezas. El primer control de malezas se llevó a cabo después del corte de la caña, aplicando N'-(3,4-diclorofenil)-N,N-dimetil urea. El segundo, al inicio de las lluvias, mediante chapeo manual, aplicación de herbicida post emergente (Hexazinona + N'-(3,4-diclorofenil)-N,N-

Cuadro 1. Datos de las parcelas de caña de azúcar utilizadas en el estudio.

Parcela No.	Nombre sitio de estudio	Cultivar	Subunidad suelo	PP (mm) de acuerdo a polígono del área de estudio	Dosis Fertilización N-P-K, kg ha ⁻¹
11	Arena Sexta	Mex 69-290	FLeu	2040	130-80-60
13	Zapotal	Mex 69-290	VReu	1960	160-60-60
17	Arena Sexta	CP 72-2086	VReu	1960	160-60-60
18	El Güiral	CP 72-2086	FLeu	2100	130-80-60

PP = precipitación; FLeu: Fluvisol eútrico; VReu: Vertisol étrico.

dimetil urea) y una aplicación de herbicida Picloram + 2,4-D para el control de malezas de hoja ancha. La fertilización, de acuerdo con el Cuadro 1, se hizo de forma manual a los dos meses de edad del cultivo; se dio un pase de cultivo con ganchos inmediatamente después de la fertilización. Para el control de rata, el ISR realiza aplicaciones una vez al año con cebos alimenticios [4-hidroxi-3-(1RS,3RS; 1RS, 3RS)-1,2,3,4-tetrahidro-3-[4-(4-trofluorometilbenziloxi)fenil]-1naftil] coumarina].

Variables de estudio

Emergencia (ahijamiento): se contó el número de tallos a los 1, 2 y 3 meses (de abril a junio 2019), después de la cosecha de caña, en dos metros lineales por subparcela.

Número de tallos: se contó cada mes desde el ahijamiento hasta la cosecha en dos metros lineales por subparcela.

Biomasa total, biomasa foliar, biomasa de tallos fresca y seca de cada cultivar por subunidad de suelo: la biomasa total (hojas más tallos) se colectó a los 3 (junio 2019 y 2020), 6 (septiembre 2019 y 2020), 9 (diciembre 2019 y 2020), y 11 (marzo 2020 y 2021) meses después del corte, en dos metros lineales por subparcela. Las muestras de biomasa cosechadas cada mes se separaron en tallos y hojas, y se pusieron a secar en estufa de circulación forzada a 65 °C durante 72 h para determinar el porcentaje de humedad y después calcular el peso seco total, de tallos y de hojas.

Índice de área foliar: se midió mensualmente desde el primer mes (abril 2019 y 2020) hasta el décimo (febrero 2020 y marzo 2021) de edad del cultivo, en dos metros lineales por subparcela, utilizando el equipo LAI[®] 2200C (LICOR, Lincoln, Estados Unidos) (Welles y Cohen 1996).

Índice de vegetación de diferencias normalizadas (NDVI): se midió mensualmente (de abril 2019 a febrero 2020 para resoca 1 y de abril 2020 a marzo 2021 para resoca 2) utilizando el sensor GreenSeeker[®] handheld crop sensor (Trimble, Westminster, Estados Unidos), en dos metros lineales por subparcela. En cada subparcela se realizaron diez lecturas, colocando el sensor a 60 cm sobre el dosel del cultivo de caña de azúcar.

Biomasa de tallos al momento de la cosecha (11 meses de edad del cultivo, marzo 2020 y 2021): se con-

taron los tallos molederos en 10 m lineales y se obtuvo el número de tallos por metro lineal y, posteriormente, este valor, se multiplicó por 7,692, que es la cantidad de m lineales ha⁻¹ de caña surcada a 1.3 m de distancia, para obtener el número de tallos ha⁻¹ (Salgado et al. 2017). Posteriormente, se tomó una muestra aleatoria de 10 tallos, los cuales se pesaron con punta y sin punta para obtener el peso promedio de los tallos y de la punta (hojas). Para la biomasa de tallos en toneladas de caña por hectárea (t ha⁻¹), se utilizó la ecuación: Biomasa de tallos (t ha⁻¹) = (Peso promedio de tallos) (número de tallos ha⁻¹) (Salgado et al. 2017).

Calidad de los jugos (°Brix, porcentajes de Pol, fibra, azúcares reductores, pureza y humedad): se determinó a los 11 meses de edad en 10 tallos tomados al azar en cada subparcela. Las determinaciones de calidad de jugo se efectuaron en el laboratorio del ISR, de acuerdo con las normas mexicanas aplicables a la industria azucarera (<https://www.gob.mx/conadesuca/documentos/normas-mexicanas-49414?state=draft>).

Datos meteorológicos

Se tomaron de la estación climatológica Wacht Dog 2900 ET más cercana a cada sitio (Arena Sexta, Zapotal y el Güiral), donde se colectaron los datos de temperatura del aire, precipitación y humedad relativa. Los datos se registraron cada 30 min.

Análisis estadístico

A los datos obtenidos se les realizó un análisis de varianza bajo el esquema de un diseño anidado cruzado de efectos fijos. El factor anidado fue el cultivar en cada tipo de suelo. Así mismo se consideraron las interacciones de cada uno de los factores de interés. Para la verificación de los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas, se llevaron a cabo pruebas de Shapiro-Wilks y de Levene, respectivamente. Para aquellas variables donde se encontraron diferencias significativas para los factores e interacciones se efectuó la prueba de comparación múltiple de medias por el método de Tukey ($P \leq 0.05$). Las correlaciones de Pearson se calcularon entre el NDVI, IAF y las variables de acumulación de biomasa, calidad y climáticas. Todos los análisis se hicieron con el programa estadístico SAS 9.2.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Condiciones climáticas durante el desarrollo del cultivo

Durante el crecimiento y desarrollo del cultivo de la caña de azúcar se registraron temperaturas máximas promedio mensuales entre 28.2 y 38.5 °C para el ciclo resoca 1 y entre 29.2 y 38.2 °C para el ciclo resoca 2 (Figura 2). En ambos ciclos, la mayor y menor temperatura máxima se presentaron en abril y enero, respectivamente. Las temperatura promedio mínima varió de 12.3 a 21.8 °C. Las temperaturas medias mensuales disminuyeron desde septiembre de 2019 hasta enero de 2020 en el ciclo resoca 1 y desde agosto de 2020 hasta enero de 2021 en el ciclo resoca 2.

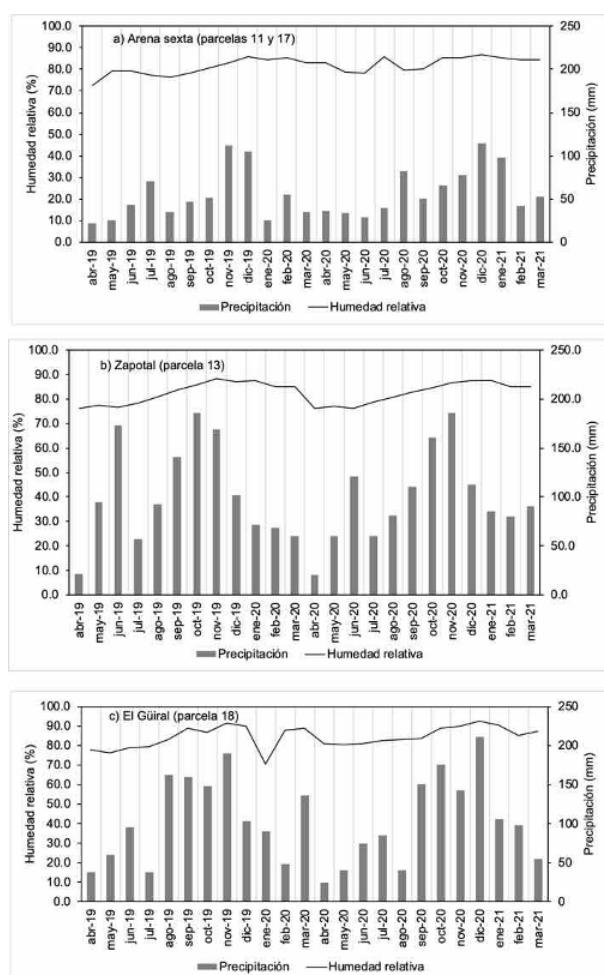


Figura 2. Temperatura máxima y mínima, y precipitación pluvial acumulada de las estaciones climatológicas: Arena Sexta (a), Zapotal (b) y el Güiral (c), Tabasco, México.

En enero, en ambos ciclos de cultivo se registraron las temperaturas medias más bajas. El rango de temperaturas presente en la zona de estudio es adecuado para el cultivo de caña. Aunque, Fauconnier y Bassereau (1975) indican que la temperatura óptima para el ahijamiento de la caña de azúcar es cercana a 30 °C y que temperaturas superiores a 38 °C afectan los procesos fisiológicos de este cultivo al reducir la tasa fotosintética e incrementar la tasa de respiración, esto significaría una limitación para la producción de biomasa. Las temperaturas de 38 °C que se observaron durante los meses de menor precipitación en el área de estudio permitieron la cosecha de la caña, pero también afectaron el rebrote del ciclo siguiente, pues se observó un menor número de tallos en ambos cultivos y subunidades de suelo.

Los meses más lluviosos fueron septiembre, octubre y noviembre en los sitios ubicados en Arena Sexta y Zapotal en los dos ciclos en estudio (Figura 2). Un periodo de baja precipitación se observó en marzo y abril en los sitios en estudio. Los meses de altas precipitaciones coinciden con edades de la caña de azúcar de ocho meses y los de menores, con la época de cosecha e inicio de rebrote de las resocas. En general, la precipitación acumulada es adecuada para el crecimiento del cultivo, ya que se requiere entre 1,100 y 1,500 mm distribuida en los meses de crecimiento vegetativo, seguido por un periodo seco durante la cosecha (Váldez et al. 2009), aunque los sitios de Arena Sexta (Cuadro 1, parcela 11 con suelo FLeu y parcela 17 con suelo VReu) presentaron precipitaciones anuales por debajo de este rango recomendado, lo que pudo afectar el desarrollo del cultivo, en particular el rebrote de las resocas (Pereira de Souza y Buckeridge 2014).

Evolución del número de tallos en cada ciclo de cultivo

El número de tallos fue afectado por el factor ciclo (resoca 1 y resoca 2) (Cuadro 2), así como por el efecto anidado del cultivar (V) dentro de la subunidad de suelo (SS). El número de tallos disminuyó con el ciclo de cultivo en todos los sitios de estudio, independientemente de la subunidad de suelo presente. En promedio, la resoca 1 presentó 36.92 tallos y la resoca 2, 18.13 tallos por dos metros lineales (Figura 3a).

Cuadro 2. Cuadrados medios de efectos principales del ANOVA de variables de acumulación de biomasa, NDVI e IAF de los cultivares Mex 69-290 y CP 72-2086 cultivados en dos subunidades de suelos del área de influencia del Ingenio Santa Rosalía, Cárdenas, Tabasco, México.

Factor de variación	GL	Cuadrado medio		
		Número de tallos	NDVI	IAF
C	1	42,412.80**	3×10^{-3} NS	515.73**
SS	1	151.88 NS	3.4×10^{-4} NS	0.18 NS
SS>V	2	233.27*	4.9×10^{-4} NS	7.74 NS
Error	475	75.06	3.4×10^{-3}	3.43
CV (%)		31.52	8.67	49.5
		Biomasa tallos (t ha ⁻¹)	Biomasa hojas (t ha ⁻¹)	Biomasa total (t ha ⁻¹)
C	1	1,071.19 NS	8,248.04**	3,374.38*
SS	1	827.33 NS	0.61 NS	782.97 NS
SS>V	2	918.88 NS	465.46**	2,574.44*
C*SS	1	4,828.08**	177.46 NS	6,856.84**
C*V	1	1,976.37*	488.44*	4,429.86*
Error	153	409.53	93.95	695.37
CV (%)		47.48	74.8	47.45

C = ciclo, V = cultivar, SS = subunidad de suelo, SS>V = factor anidado (V dentro de SS), GL = grados de libertad, * = $P < 0.05$, ** = $P < 0.01$, NS = no significativo.

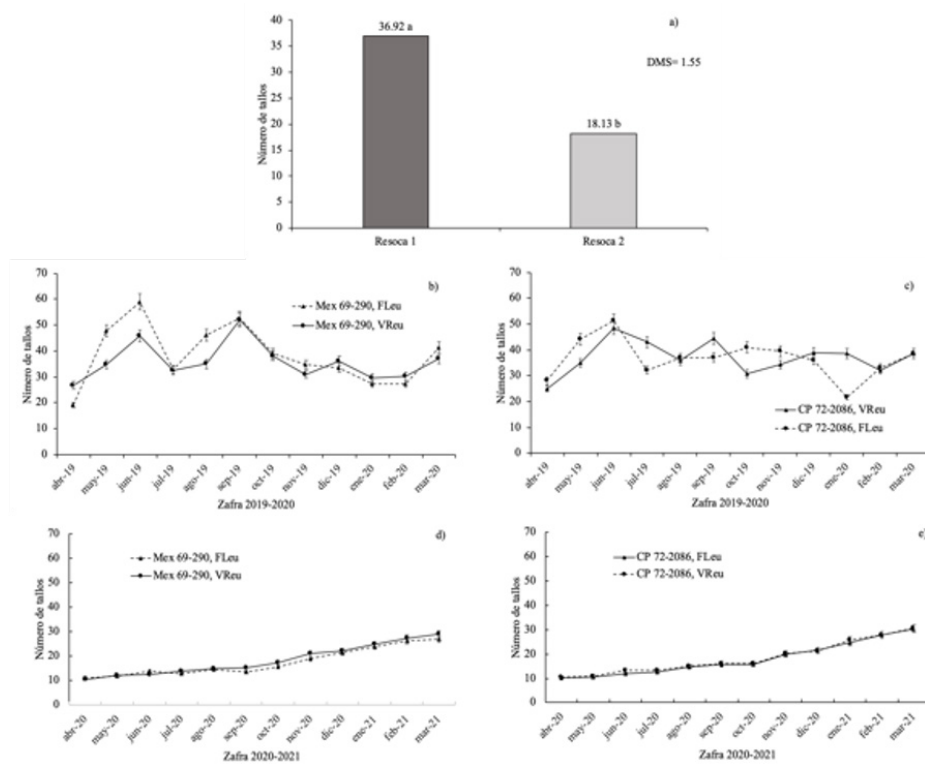


Figura 3. Promedio de número de tallos en 2 m lineales de primera y segunda resoca (a), y evolución en el tiempo del número de tallos en resoca 1 para las variedades Mex 69-290 (b) y CP 72-2086 (c) y resoca 2 (d) y (e) de caña de azúcar cultivadas en dos subunidades de suelo del área de influencia del Ingenio Santa Rosalía, Cárdenas, Tabasco, México. Las barras indican el error estándar de la media.

Respecto al efecto de anidamiento SS>V en el número de tallos (Cuadro 2), en ambos cultivares, durante el desarrollo fenológico de la resoca 1, se observó una reducción en el número de tallos a partir de los seis meses de edad del cultivo, principalmente en Mex 69-290 en suelo VReu. En ambas subunidades de suelo, Mex 69-290 aumentó la cantidad de tallos a los tres meses de edad de cultivo (de 26 a 45 en VReu y de 19 a 59 en FLeu), pero a partir de los 6 (septiembre) y hasta los 12 meses de edad la cantidad de tallos disminuyó de 52 a 37 (VReu) y 41 (FLeu) tallos por dos metros lineales (Figura 3b).

Un comportamiento similar mostró CP 72-2086 en ambas subunidades de suelo, al incrementar a 48 (VReu) y 51 (FLeu) tallos a los tres meses, para disminuir a 44 (VReu) y 37 (FLeu) tallos a los seis meses de edad y manteniendo a los 12 meses, 38 tallos (Figura 3c). Esta mortalidad de tallos en caña de azúcar se ha asociado con una mayor sincronía en el rebrote, lo que resulta en una mayor competencia por nutrientes y agua, lo que los lleva a la senescencia (Vasanthan et al. 2014).

Aunque diversos estudios han asociado el desarrollo más rápido del dosel de ciertos cultivares con una reducción de la interceptación de luz de los estratos medios e inferiores del dosel, lo que afecta la producción de fotoasimilados para alimentar el crecimiento de los tallos, dándose la senescencia de los mismos (Simões et al. 2005b; Bonnet 2014) —lo que parece ser el caso en este estudio para la resoca 1—, este comportamiento no se observó en la resoca 2 (Figura 3d y 3e), donde el número final de tallos fue de 25 y 29 para Mex 69-290 en suelos FLeu y VReu, respectivamente, mientras que CP 72-2086 presentó 28 y 30 tallos en VReu y FLeu, respectivamente.

Acumulación de biomasa de tallos, follaje y total

No se observaron efectos significativos del ciclo de cultivo (C), subunidad de suelo (SS), el efecto anidado del cultivar en la SS para biomasa de tallos, pero sí para las interacciones C*SS y C*V (Cuadro 2). En contraste, para biomasa de hojas y total se observaron efectos significativos para ciclo de cultivo, el efecto anidado SS>V y sus interacciones, con excepción de la SS. En la resoca 1, Mex 69-290 no muestra diferencias en la acumulación de biomasa de tallos en ambas

subunidades de suelo (Figura 4a), pero en la resoca 2, la acumulación de esta biomasa en tallos fue fuertemente afectada cuando se cultivó en la subunidad FLeu (Figura 5a).

Respecto a CP 72-2086, en resoca 1 acumuló mayor biomasa de tallos en la subunidad FLeu, y en la resoca 2 en la subunidad VReu (Figura 5b). A la cosecha, la biomasa de tallos en resoca 1 fue de 106.7 t ha⁻¹ para CP 72-2086 en FLeu y 75.8 t ha⁻¹ para Mex 69-290 en suelo VReu; en resoca 2, 59.6 t ha⁻¹ para CP 72-2086 en suelo VReu y 57.2 t ha⁻¹ para Mex 69-290 en suelo FLeu.

La biomasa del follaje se incrementó linealmente desde diciembre de 2019 para el caso de Mex 69-290 en VReu, así como para CP 70-2086 en FLeu en el ciclo resoca 1 (Figuras 4c y 4d). En el ciclo resoca 2, ambos cultivares produjeron menor follaje en ambas subunidades de suelo (Figura 6) y se dio un decremento del mismo al final del ciclo (Figuras 5c y 5d). En biomasa total, ambos cultivares mostraron similar comportamiento que en la acumulación de biomasa de tallos en las dos subunidades de suelo y ciclos de cultivo (Figuras 4 y 5).

Asimismo, CP 72-2086, tanto en resoca 1 como en resoca 2, acumuló mayor biomasa de tallos en la subunidad FLeu. A la cosecha, la biomasa de tallos en resoca 1 fue de 106.7 t ha⁻¹ para CP 72-2086 en FLeu y 75.8 t ha⁻¹ para Mex 69-290 en suelo VReu; en el caso de resoca 2, fue de 59.6 t ha⁻¹ para CP 72-2086 en suelo VReu y 57.2 t ha⁻¹ para Mex 69-290 en suelo FLeu.

La respuesta del cultivo en biomasa de hojas y total a la subunidad de suelo puede, entre otros factores, estar asociada a características físicas del suelo como retención de humedad, ya que la disponibilidad de agua del suelo depende de las precipitaciones durante el año, puesto que no se aplica riego. Esta disponibilidad de agua y la retención de humedad del suelo es esencial para la absorción de nutrientes y el crecimiento de la planta (Silva et al. 2017). Pero si hay suficiente humedad, entonces también la respuesta del cultivo puede estar asociada a la capacidad del cultivar para absorber los nutrientes (Salgado-García et al. 2013). En este caso, el suelo FLeu presentó menor humedad en el sitio cultivado con CP 72-2086 en resoca 2.

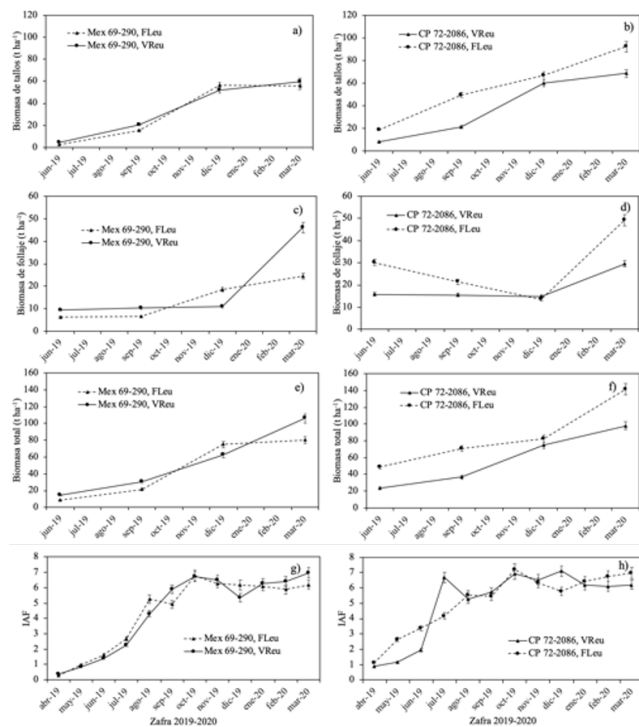


Figura 4. Ciclo resoca 1. Dinámica de la acumulación de biomasa de tallos de Mex 69-290 (a) y CP 72-2086 (b); biomasa follaje de Mex 69-290 (c) y CP 72-2086 (d); biomasa total de Mex 69-290 (e) y CP 72-2086 (f), e índice de área foliar (IAF) (g y h), cultivadas en dos subunidades de suelos del área de abastecimiento del Ingenio Santa Rosalía, Cárdenas, Tabasco, México. FLeu = Fluvisol eútrico, VReu = Vertisol eútrico. Las barras indican el error estándar de la media.

Índice de Área Foliar (IAF)

Para IAF, se detectaron efectos significativos por efecto de ciclo (C) (Cuadro 2). En promedio, el ciclo resoca 1 presentó mayor IAF (4.78) que resoca 2 (2.71). Ambos cultivares presentaron IAF más elevados en resoca 1 que en resoca 2 (Figuras 4 y 5). A la cosecha, resoca 1 con 6.97 (CP 72-2086, FLeu), 6.95 (Mex 69-290, VReu), 6.63 (CP 72-2086, VReu) y 6.34 (Mex 69-290, FLeu), y resoca 2 con 4.92 (Mex 69-290, VReu; CP 72-2086, VReu), 4.68 (CP 72-2086, FLeu) y 4.60 (Mex 69-290, FLeu). El mayor IAF en el ciclo resoca 1 para ambos cultivares no representaría un mayor rendimiento de caña al momento de la madurez, ya que existe una retroalimentación negativa entre las fuentes (follaje) y las demandas (tallos) en caña de azúcar, donde el follaje también está consumiendo fotoasimilados para su crecimiento (McCormick et al. 2009); sin embargo, algunos autores han observado una asociación positiva entre mayor IAF y rendimiento de caña (Vasanth et al. 2014), lo que se observó en los cultivares evaluados (Cuadro 3).

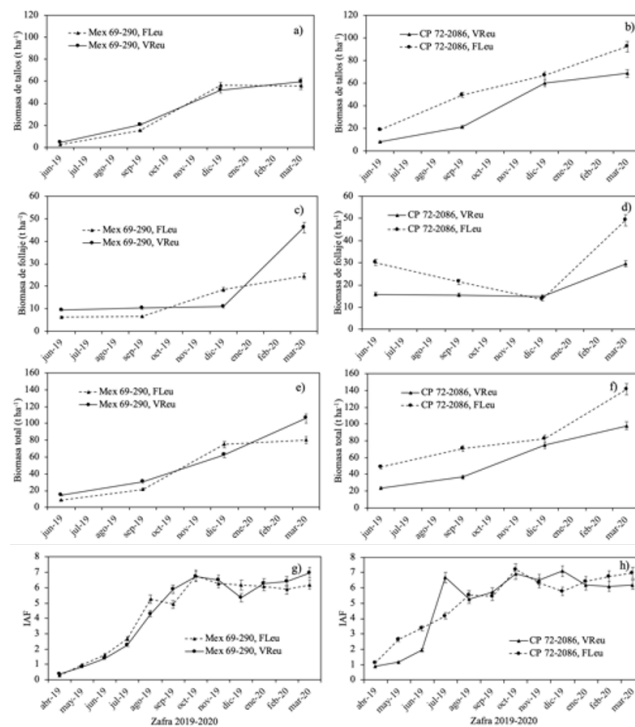


Figura 5. Ciclo resoca 2. Dinámica de la acumulación de biomasa de tallos de Mex 69-290 (a) y CP 72-2086 (b); biomasa follaje de Mex 69-290 (c) y CP 72-2086 (d); biomasa total de Mex 69-290 (e) y CP 72-2086 (f), e índice de área foliar (IAF) (g y h), cultivadas en dos subunidades de suelos del área de abastecimiento del Ingenio Santa Rosalía, Cárdenas, Tabasco, México. FLeu = Fluvisol eútrico, VReu = Vertisol eútrico. Las barras indican el error estándar de la media.

Cambios en el Índice de Vegetación de las Diferencias Normalizadas (NDVI)

El resultado del ANOVA para el NDVI no mostró efectos significativos ni para la subunidad de suelo, ni para el ciclo de cultivo, y tampoco para el efecto del cultivar anidado en el suelo (Cuadro 2).

El NDVI se incrementó con el crecimiento del dosel del cultivo de caña de azúcar, y se estabilizó a los ocho meses, cuando ocurre el cierre del dosel, en resoca 1 (Figura 6). En resoca 1, los rangos de variación para el NDVI fueron, en suelo VReu, de 0.59 a 0.74 para CP 72-2086, y de 0.60 a 0.73 para Mex 69-290; en suelo FLeu, de 0.55 a 0.82 para CP 72-2086, y de 0.55 a 0.67 para Mex 69-290. En resoca 2, el NDVI presentó una disminución a los tres meses de edad del cultivo para después incrementar linealmente hasta la cosecha. En este ciclo, los rangos de variación en suelo VReu fueron de 0.61 a 0.79 para CP 72-2086 y de 0.58 a 0.75 para Mex 69-290; en suelo FLeu, de 0.63 a 0.73 para CP 72-2086, y de 0.64 a 0.77 para Mex 69-290.

El descenso en el NDVI observado durante los primeros cuatro meses del cultivo de la resoca 2 tal vez

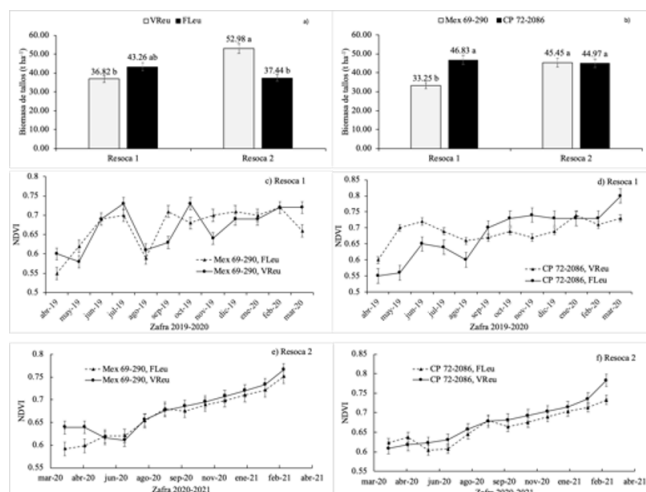


Figura 6. Promedio de biomasa de tallos por tipo de suelo (a) y por variedad (b), y NDVI en Resoca 1 (c y d) y Resoca 2 (e y f), cultivadas en dos subunidades de suelos del área de abastecimiento del Ingenio Santa Rosalía, Cárdenas, Tabasco, México. FLeu = Fluvisol eútrico, VReu = Vertisol eútrico. Las barras indican el error estándar de la media.

está asociado con el periodo de baja precipitación que se observó en los meses de marzo y abril en las tres estaciones en estudio durante 2020, lo que pudo afectar el crecimiento vegetativo de las variedades en ambas subunidades de suelo, especialmente de CP 72-2086 en suelo FLeu, y, por ende, cambiar la reflectancia de las hojas. Estos rangos de variación en NDVI de los cultivos en estudio están dentro de los rangos observados en caña de azúcar (0.6 al inicio, para llegar a 0.8 al final del ciclo) durante 2004, 2005 y 2006 en Altinópolis, Sao Paulo, Brasil (Fernandes et al. 2017).

Calidad de jugos

En el ciclo resoca 2, ambas variedades presentaron valores de Brix (%) y Pol (%) más altos que en el ciclo resoca 1 en ambas subunidades de suelo (Cuadro 3). El contenido de fibra y la pureza oscilaron entre 11.2 y 12.68 por ciento, así como entre 73.6 y 89.0 por ciento, respectivamente. Los azúcares reductores fueron más altos significativamente (1.45 %) para CP 72-2086 en suelo VReu en el ciclo resoca 1. Los valores observados en ambas variedades son similares a los observados por Salgado-García et al. (2016) en otros estudios con las mismas variedades (Cuadro 3).

Relación entre los índices de área foliar y de vegetación con la biomasa

En el Cuadro 4 se presentan las correlaciones de Pearson entre el NDVI y IAF con las variables de acumulación de biomasa. Los resultados muestran una correlación altamente significativa ($P \leq 0.05$) entre el NDVI e IAF, con un coeficiente de correlación (R) de 0.61, respectivamente. Esta correlación indica la relación existente entre estos dos índices (a mayor IAF, mayor reflectancia espectral del dosel), pero esta relación es no lineal y la reflectancia puede variar dependiendo de la fenofase del cultivo y las condiciones ambientales (Bajocco et al. 2022).

Cuadro 3. Datos de calidad de jugo de las variedades evaluadas en los ciclos resoca 1 y 2 establecidas en las subunidades de suelo del área de abastecimiento del Ingenio Santa Rosalía, Cárdenas, Tabasco, México.

Variedad	SS	°Brix	Pol	Pureza	Fibra	Azúcares reductores	Humedad
Resoca 1							
Mex 69-290	VReu	14.17c	12.17c	85.77a	10.38b	0.76b	75.83a
	FLeu	15.26bc	13.25bc	86.73a	12.37a	0.69b	73.03bc
CP 72-2086	VReu	11.81d	8.71d	73.68b	11.2ab	1.45a	77.6a
	FLeu	16.28bc	13.79bc	84.17a	12.89a	0.67b	71.17bcd
Resoca 2							
Mex 69-290	VReu	19.3a	16.91a	87.55a	12.17ab	0.81b	70.0d
	FLeu	19.02a	16.9a	88.8a	12.52a	0.33b	69.5d
CP 72-2086	VReu	17.38ab	15.48ab	89.07a	12.68a	0.40b	70.57cd
	FLeu	15.85bc	13.54bc	85.49a	11.89ab	0.68b	73.13b

SS = Subunidad de suelo, Letras iguales por columna no son estadísticamente diferentes ($P \leq 0.05$).

Cuadro 4. Correlaciones de Pearson entre el NDVI y el IAF con la acumulación de biomasa de los cultivares Mex 69-290 y CP 72-2086 cultivados en dos subunidades de suelo del área de abastecimiento del Ingenio Santa Rosalía, Cárdenas, Tabasco, México.

Variables		R	P-value	Variables		R	P-value
	IAF	0.61	<0.0001*	NDVI		0.61	<0.0001*
	Número Tallos	0.29	<0.0001*	Número Tallos		0.55	<0.0001*
NDVI	BT	0.46	0.01	IAF	BT	0.55	<0.0001*
	BF	0.29	0.10		BF	0.57	<0.0001*
	BTOT	0.47	0.10		BTOT	0.66	<0.0001*

N. Tallos = número de tallos, BT = biomasa de tallos, BF = biomasa de follaje, BTOT = biomasa total, * = significancia al $P \leq 0.05$.

El NDVI ha mostrado una alta correlación con otros parámetros fisiológicos del cultivo, incluyendo la producción de biomasa. Sin embargo, en los ciclos resocas en estudio no se reportaron correlaciones significativas entre NDVI y acumulación de biomasa.

En caña de azúcar, el NDVI ha mostrado correlación significativa con el rendimiento en caña y en sacarosa cuando se utilizan los GDD (r^2 0.48 y 0.42, respectivamente) (Lofton et al. 2012). Utilizando el sensor GreenSeeker® para medir el NDVI, Jurecka et al. (2016) encontraron correlaciones de 0.61 y 0.72 entre el NDVI y el rendimiento de caña de azúcar.

El IAF mostró correlaciones positivas y significativas con la acumulación de biomasa, con un coeficiente de correlación (R) de 0.55, 0.57 y 0.66, entre IAF y biomasa de tallos, biomasa de follaje y biomasa total, respectivamente. El IAF es un parámetro biofísico que contribuye a estimar la productividad de los cultivos (Da Silva et al. 2017). Pocos estudios en caña de azúcar han mostrado la relación entre IAF y rendimiento de caña. Abu-Ellail et al. (2020) mostraron, al estudiar cinco genotipos de caña de azúcar, que el genotipo

(G-2003-47) con el IAF más alto (6.3) a los 12 meses de edad fue también uno de los que mostró mayor rendimiento de tallos, y en las resocas en estudio esto se observa con la biomasa de tallos a la cosecha.

Relación entre variables climáticas, índices de vegetación y parámetros fisiológicos en caña de azúcar

En el Cuadro 5 se presentan las correlaciones entre variables climáticas con las de acumulación de biomasa. La temperatura media mostró correlaciones negativas y significativas ($P \leq 0.05$) con IAF, NDVI, biomasa de tallos y biomasa total. Asimismo, la temperatura máxima mostró correlaciones significativas y negativas ($P \leq 0.05$) con IAF, NDVI y biomasa de tallos y total. Es decir, a mayor temperatura menor biomasa de tallos y total, IAF y NDVI. Lo anterior concuerda con lo expuesto por Fauconnier y Bassereau (1975), al señalar que temperaturas superiores a 38 °C reducen la tasa fotosintética e incrementan la tasa de respiración, lo que repercute directamente en la formación

Cuadro 5. Correlaciones de Pearson (R) entre variables climáticas, IAF, NDVI y acumulación de biomasa de los cultivares Mex 69-290 y CP 72-2086 cultivados en dos subunidades de suelo del área de abastecimiento del Ingenio Santa Rosalía, Cárdenas, Tabasco, México.

Variable	Tmed		Tmax		Tmin		Pp		HR	
	R	Valor de P	R	P-value	R	P-value	R	P-value	R	P-value
IAF	-0.54	<0.0001*	-0.59	0.001*	-0.22	0.03	0.28	0.01	0.45	<0.0001*
NDVI	-0.53	<0.0001*	-0.59	<0.0001*	-0.20	0.06	0.26	0.01	0.53	<0.0001*
N. Tallos	-10	0.33	-0.17	0.15	0.01	0.95	0.11	0.30	0.01	0.89
BT	-0.65	<0.0001*	-0.54	<0.0001*	-0.38	0.03	0.03	0.89	0.61	<0.0001*
BF	0.25	0.17	0.39	0.06	-0.01	0.96	-0.02	0.96	0.14	0.44
BTOT	-0.59	<0.0001*	-0.57	<0.0001*	-0.29	0.10	0.02	0.95	0.52	<0.0001*

Tmed = temperatura media, Tmax = temperatura máxima, Tmin = temperatura mínima, Pp = precipitación, HR = humedad relativa, BT = biomasa de tallos, BF = biomasa de follaje, BTOT = biomasa total, N. Tallos = número de tallos, * = significancia al $P \leq 0.05$.

de biomasa. La temperatura mínima no mostró correlaciones significativas con ninguna variable de acumulación de biomasa.

Las correlaciones entre la humedad relativa y NDVI, así como biomasa de tallos fueron positivas y significativas con un R de 0.53 y 0.61, respectivamente. Es decir, que a mayor humedad relativa mayor acumulación de biomasa de tallos. Estas correlaciones confirman el efecto de las variables climatológicas en el crecimiento de la caña de azúcar; mientras las temperaturas altas muestran un efecto negativo, la humedad relativa revela un efecto positivo.

CONCLUSIONES

La acumulación de biomasa de la primera y segunda resoca en los cultivares en estudio fue afectada por el cultivar y la subunidad de suelo. El cultivar Mex 69-290 mostró mayor acumulación de biomasa de tallo, en la subunidad de suelo VReu, y el cultivar CP 72-2086, en la subunidad de suelo FLeu. La cantidad de tallos, IAF y biomasa de tallos para ambos cultivares disminuyó con el ciclo de cultivo. El IAF presentó correlaciones altas y positivas con biomasa del tallo, del follaje y total. Las correlaciones entre NDVI con IAF fueron altas y positivas. Ni la subunidad de suelo ni el cultivar afectaron la calidad de los jugos. Las variables climáticas de temperatura media y máxima, precipitación y humedad relativa mostraron correlaciones significativas y negativas con el IAF, NDVI y acumulación de biomasa en tallos y total.

AGRADECIMIENTOS

El primer autor agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada para la realización de sus estudios de posgrado. *In memoriam* al Dr. Sergio Salgado García, líder del grupo MASCAÑA.

LITERATURA CITADA

Abu-Ellail FFB, Gadallah AFI, El-Gamal ISH. 2020. Genetic variance and performance of five sugarcane varieties

- for physiological, yield and quality traits influenced by various harvest age. *Journal of Plant Production* 11: 429-438. <https://doi.org/10.21608/jpp.2020.102763>
- Bajocco S, Ginaldi F, Savian F, Morelli D, Scaglione M, Fanchine D, Raparelli E, Bregaglio SUM. 2022. On the use of NDVI to estimate LAI in field crops: Implementing a conversion equation library. *Remote Sensing* 14: 3554. <https://doi.org/10.3390/rs14153554>
- Bonnet GD. 2014. Developmental stages (phenology). En: Moore PH, Botha FC, editores. *Sugarcane: Physiology, Biochemistry, and Functional Biology*. Hoboken, John Wiley & Sons, Inc. P. 35-53.
- Cañeros. [internet]. 2021. Estadísticas por ingenio. Unión Nacional de Cañeros, A.C. [citado 2022 mayo 29]. Disponible en: <http://www.caneros.org.mx/>
- Da Silva VSG, De Oliveira MW, Oliveira TBA, Mantovanelli BC, Da Silva ACI, Soares ANR, Clemente PRAI. 2017. Leaf area of sugarcane varieties and their correlation with biomass productivity in three cycles. *African Journal of Agricultural Research* 12: 459-466.
- Fauconnier D, Bassereau D. 1975. La caña de azúcar: técnicas agrícolas y producciones tropicales. Editorial BLUME. Barcelona, España.
- Fernandes JL, Ebecken NFF, Esquerdo JCDM. 2017. Sugarcane yield prediction in Brazil using NDVI time series and neural networks ensemble. *International Journal of Remote Sensing* 38: 4631-4644. <https://doi.org/10.1080/01431161.2017.1325531>
- Jurecka F, Hlavinka P, Lukas V, Trnka M, Zalud Z. 2016. Crop yield estimation in the field level using vegetation indices. MendelNet 2016: Proceedings of International PhD students Conference. Brno, Moravia, República Checa.
- Lofton J, Tubana BS, Kanke Y, Teboh J, Viator H, Dalen M. 2012. Estimating sugarcane yield potential using an in-season determination of normalized difference vegetative index. *Sensors (Basel)* 12: 7529-7547. <https://doi.org/10.3390/s120607529>
- Mauri R, Coelho RD, Fraga Jr EF, Barbosa FA, Leal DPV. 2017. Water relations at the initial sugarcane growth phase under variable water deficit. *Engenharia Agrícola* 37: 268-276. <https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v37n2p268-276/2017>
- McCormick AJ, Watt DA, Cramer MD. 2009. Supply and demand: Sink regulation of sugar accumulation in sugarcane. *Journal of Experimental Botany* 60: 357-364. <https://doi.org/10.1093/jxb/ern310>

- Pereira de Souza A, Buckeridge MS. 2014. Photosynthesis in sugarcane and its strategic importance to face the global climatic change. En: Cortez LAB, coordinador. Sugarcane Bioethanol — R&D for Productivity and Sustainability. São Paulo, Editora Edgard Blücher. P. 359-354. https://doi.org/10.5151/BlucherOA-Sugarcane-SUGARCANEETHANOL_36
- Rudorff BFT, Batista GT. 1990. Yield estimation of sugarcane based on agrometeorological-spectral models. *Remote Sensing of Environment* 33: 183-192. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(90\)90029-L](https://doi.org/10.1016/0034-4257(90)90029-L)
- Salgado S, Izquierdo J, Lagunes LC, Palma DJ, Córdova S, Ortiz H, Castelán M. 2017. Consumo de nitrógeno por cultivares de caña de azúcar. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias* 49: 45-59.
- Salgado-García S, Palma-López DJ, Lagunes-Espinoza LC, Ortiz-García CF, Ascencio-Rivera JM. 2005. Bases para generar un programa sustentable de fertilización en un ingenio de Tabasco, México. *Interciencia* 30: 395-403.
- Salgado-García S, Lagunes ELC, Núñez ER, Ortiz GCF, Bucio AL, Aranda IEM. 2013. Caña de azúcar: producción sustentable. BBA-Colegio de Postgraduados-Mundi Prensa. Ciudad de México, México.
- Salgado-García S, Castelán-Estrada M, Aranda-Ibáñez EM, Ortiz-Laurel H, Lagunes-Espinoza LC, Córdova-Sánchez S. 2016. Calidad de jugos de caña de azúcar (*Saccharum* spp.) según el ciclo de cultivo en Chiapas, México. *Agroproductividad* 9: 23-28.
- Salgado-Velázquez S, Salgado-García S, Rincón-Ramírez JA, Rodrigues Jr FA, Palma-López DJ, Córdova-Sánchez S, López-Castañeda A. 2020. Spatial variability of soil physicochemical properties in agricultural fields cultivated with sugarcane (*Saccharum officinarum* L.) in Southeastern Mexico. *Sugar Tech* 22: 65-75. <https://doi.org/10.1007/s12355-019-00742-9>
- Silva VSG, Oliveira MW, Oliveira DC, Oliveira TBA, Pereira MG, Nogueira CHC. 2017. Nutritional diagnosis of sugarcane varieties in a Yellow Oxisol during three agricultural seasons. *African Journal of Agricultural Research* 12: 50-57.
- Simões MDS, Rocha VJ, Lamparelli RA. 2005a. Growth indices and productivity in sugarcane. *Scientia Agricola* (Piracicaba, Braz.) 62: 23-30. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162005000100005>
- Simões MDS, Rocha JV, Lamparelli RAC. 2005b. Spectral variables, growth analysis and yield of sugarcane. *Scientia Agricola* (Piracicaba, Brazil) 62: 199207. <https://doi.org/10.1590/s0103-90162005000300001>
- Váldez BA, Guerrero PA, García-López E, Obrador OJJ. 2009. Manual para el cultivo y producción de la caña de azúcar. Colegio de Postgraduados. Cárdenas, México.
- Vasanth S, Gupta S, Shekinah DE. 2014. Physiological studies on tiller production and its senescence in sugarcane-response comparison between plant and ratoon crops. *Indian Journal of Agricultural Sciences* 84: 24-27. <https://doi.org/10.56093/ijas.v84i1.37145>
- Welles JM, Cohen S. 1996. Canopy structure measurement by gap fraction analysis using commercial instrumentation. *Journal of Experimental Botany* 47: 1335-1342.
- Zenteno CGA, Palacios VE, Tijerina ChL, Flores MH. 2017. Aplicación de tecnologías de percepción remota para la estimación del rendimiento en caña de azúcar. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 8: 1575-1586.
- Zhao D, Li Y-R. 2015. Climate change and sugarcane production: Potential impact and mitigation strategies. *International Journal of Agronomy* 2015: 547386. <https://doi.org/10.1155/2015/547386>