

EFECTO DE LA TEMPERATURA DEL AIRE EN EL CRECIMIENTO Y DESARROLLO DE LA CAÑA DE AZÚCAR EN EL ARCO SECO DE PANAMÁ.

**EFFECT OF AIR TEMPERATURE ON THE GROWTH AND DEVELOPMENT OF
SUGAR CANE IN THE DRY ARC OF PANAMA.**

Antonio Menéndez Sierra¹

¹Universidad Central del Este, San Pedro de Macorí. Republica Dominicana. amenendez90@hotmail.com,
amenendez@uce.edu.do; <http://info@uce.edu.do>

Recepción: 25 de diciembre de 2022

Aprobación: 24 de marzo de 2023

RESUMEN

Durante el periodo de 2009 al 2015 se montaron, midieron y analizaron 40 puntos de observación permanente en el arco seco de Panamá para estudiar el efecto del clima en el crecimiento y el desarrollo de la caña de azúcar. Las variables independientes (temperatura máxima, mínima, promedio y amplitud térmica) fueron procesadas en rangos mediante técnicas no paramétricas, regresiones y modelos lineales discontinuos, junto a las variables dependientes (altura, grosor y número de tallos por metro lineal de surco). Se calcularon además los Grados Día de Crecimiento (GDC). Los resultados mostraron que las temperaturas están relacionadas con el crecimiento mediante un modelo cuadrático con el que se estableció la temperatura base para el cultivo ($T_b = 24.8 \text{ }^\circ\text{C}$); la temperatura óptima ($T_o = 27.7 \text{ }^\circ\text{C}$) y la temperatura máxima ($T_m = 30.5 \text{ }^\circ\text{C}$). Los tiempos térmicos fueron estimados a partir de modelos lineales discontinuos, evaluados en las tangentes en los cambios de pendiente, obteniendo los valores en GDC desde la cosecha hasta: el final del periodo de ahijamiento (248.24); el final del gran periodo de crecimiento (880.95) y el momento a la cosecha siguiente (1131.5) y por diferencia la duración de cada etapa. Se observó una dependencia estadística significativa entre los GDC y las velocidades de crecimiento. Esta relación puede ser usada para evaluar el desarrollo de un campo. Cuando se clasificaron los días de acuerdo con la temperatura promedio y su efecto sobre el crecimiento se pudo observar que en general un 65 % fueron buenos, un 23.62 % fueron

regulares y un 11.34 % fueron malos o nulos; estos porcentajes variaron por años resultando en periodos, unos mejores que otros, (años buenos y años malos). Este efecto puede empeorar debido a la variabilidad de la temperatura inducida por el cambio climático.

Palabras clave: Cambio Climático, Caña de azúcar, Crecimiento y desarrollo, Temperatura.

ABSTRACT

During the period from 2009 to 2015, 40 permanent observation points were set up, measured and analyzed in the dry arc of Panama to study the effect of climate on the growth and development of sugarcane. The independent variables (maximum, minimum, average temperature, and thermal amplitude) were processed into ranges using non-parametric techniques, regressions, and discontinuous linear models, together with the dependent variables (height, thickness, and number of stems per linear meter of furrow). The Growth Degree Days (GDC) were also calculated. The results showed that the temperatures are related to the growth through a quadratic model with which the base temperature for the culture was established ($T_b = 24.8$ °C); the optimal temperature ($T_o = 27.7$ °C) and the maximum temperature ($T_m = 30.5$ °C). The thermal times were estimated from discontinuous linear models, evaluated in the tangents in the slope changes, obtaining the values in GDC from harvest to: the end of the tillering period (248.24); the end of the great period of growth (880.95) and the time to the following harvest (1131.5) and by difference the duration of each stage. A significant statistical dependence was observed between the GDCs and the growth rates. This relationship can be used to evaluate the development of a field. When the days were classified according to the average temperature and their effect on growth, it was observed that in general 65% were good, 23.62% were regular and 11.34% were bad or null; these percentages varied by year resulting in periods, some better than others, (good years and bad years). This effect may worsen due to temperature variability induced by climate change.

Keywords: Climate Change, Sugarcane, Growth and development, Temperature.

INTRODUCCIÓN

Desde que Reaumur, en 1730, inventó el termómetro de alcohol e introdujo el concepto de “requerimientos térmicos de las plantas para alcanzar su madures”, los técnicos e investigadores están tratando de cuantificar en qué medida la dinámica del desarrollo vegetal está definida por este factor. (Wang, 1960).

En términos generales se sabe que la temperatura determina la distribución geográfica de las plantas, su desarrollo y su rendimiento, además sus cambios inciden en la velocidad con que ocurren los eventos fisiológicos, lo que influye en aspectos agrícolas tales como:

1. La duración del ciclo del cultivo y sus diferentes fases.
2. El pronóstico del rendimiento.
3. Los coeficientes de evapotranspiración.
4. La absorción de los nutrientes.
5. La aparición de plagas y enfermedades.

Uno de los usos más comunes que se le ha dado es establecer la demanda energética de cada etapa fenológica lo que le permite al técnico o productor predecir y proyectar el crecimiento cuando se cultiva en condiciones diferentes, aspecto vital sobre todo en los tiempos actuales donde hay tanta transferencia de tecnología e intercambio y/o introducción de nuevos genotipos. Sin embargo, su efecto sobre la velocidad de crecimiento no es tomado en cuenta a la hora de estimar la producción de los campos.

Dentro de los índices más comúnmente usados para estimar el desarrollo de las plantas en función de la temperatura están los GRADOS-DÍA-DE-CRECIMIENTO, GDC, (Growing Degree Days), o las UNIDADES TÉRMICAS (HT) que algunos autores también llaman “TIEMPO TÉRMICO” (TT).

Estos índices se fundamentan en la diferencia entre tiempo cronológico y tiempo fisiológico, definidos como tiempo cronológico: el tiempo necesario para que una planta cambie de un estado de desarrollo a otro, y tiempo fisiológico como la energía necesaria para que la planta cambie de un estado a otro, con la diferencia que mientras el tiempo cronológico puede cambiar, influenciado por las variables climáticas, el tiempo fisiológico está determinado únicamente por la temperatura, que es la variable que controla la velocidad de las reacciones bioquímicas.

El efecto de la temperatura se mide mediante la acumulación de calor en la planta a partir de una temperatura base (T_b) por debajo de la cual el crecimiento es “0” y cuyo valor es propio para cada especie, cultivo o variedad.

Los GDC para un cultivo son la diferencia entre la temperatura media, en una localidad dada, y la temperatura base de un cultivo en cuestión, pudiendo estimarse para un día, o acumularse para una semana, mes, año o una fase de crecimiento. Puede decirse que es la suma de calor que expresa la cantidad total de energía a que la planta estuvo sometida en un periodo de tiempo.

$$GD = \frac{(t_{max} - t_{min})}{2} - tb \quad GDC = \sum GD \ 1 \rightarrow n$$

Donde:

GD = Grados día.

tmax = temperatura máxima.

tmin = temperatura mínima.

tb = temperatura base.

GDC = grados día de crecimiento.

n = número de días del periodo evaluado.

En caña de azúcar los estudios con relación al efecto de la temperatura no abundan y más bien son de tipo descriptivo, usando extrapolaciones de otros cultivos y/o las características usuales de las zonas donde se cultiva el género, pero estudios realizados en maíz han demostrado que si bien el tiempo que transcurre hasta alcanzar una determinada etapa de desarrollo no es una función lineal de la temperatura (Tollenaar et al., 1979; Warrington & Kanemasu, 1983), la respuesta de la velocidad de desarrollo (inversa a la duración en días de la etapa) a la misma, es aproximadamente lineal en el rango térmico comprendido entre una temperatura base (temperatura mínima a la cual la velocidad de desarrollo es nula) y una temperatura óptima (a la cual se alcanza la máxima velocidad de desarrollo); Warrington & Kanemasu, 1983; Ellis et al., 1992). Por encima de la temperatura óptima el desarrollo se reduce progresivamente hasta detenerse al alcanzar un límite máximo de temperatura.

Este estudio busca contribuir al conocimiento que se tiene sobre los efectos del clima y explicar en qué medida la temperatura influye en el crecimiento y desarrollo del cultivo de la caña de azúcar, en la zona del “ARCO SECO DE PANAMÁ”

MATERIALES Y MÉTODOS.

Entre los años 2009 y 2014 se montaron, midieron y analizaron 40 puntos de observación permanente (POP) en caña de azúcar dentro de las áreas de la “Compañía Azucarera La Estrella S.A. (CALESA) ubicada en la zona conocida como “Arco Seco de Panamá” en la vertiente sur del Pacífico panameño, cerca del poblado de Aguadulce, provincia de Coclé.

Se llamó punto de observación permanente (POP) a un área fija de 4 surcos de 10 m de largo de un campo cultivado con caña de azúcar en la que, mensualmente, se media altura y diámetro en 10 tallos y donde además se contaban los tallos para determinar tallos por metro lineal de surco. (figura 1, ubicación geográfica de los POP)

Los lugares seleccionados se mantuvieron como puntos de muestreo permanente por un periodo de 6 años; otras características como variedad, tipo de suelo, clase agro-productiva, categoría de inundación, época y edad de cosecha, etc. fueron tomadas de los datos generales de los campos donde se encontraban los POP.

La ubicación de los POP fue sistemática, buscando representar todas las condiciones de la empresa, además de facilitar el desarrollo de modelos de terreno para representar y extrapolar tanto las condiciones como los resultados. Las mediciones se realizaban mensualmente: la altura siempre desde la base hasta el primer dewlap visible superior (tvd), el diámetro en la parte central del tallo y se contaban todos los tallos en los dos surcos centrales (20 m de surco).

Los datos climáticos eran suministrados por una estación automática tipo MISOL Wireless, que leía y registraba la información cada 1 hora, aunque los datos eran promediados por día y por mes.

Se consideraron variables dependientes la altura, el grosor y el número de tallos por metro lineal de surco y variables independientes la temperatura máxima, mínima y promedio y la amplitud térmica. En el caso del número de tallos por metro lineal de surco y el diámetro se trabajó con los totales de cada medición de cada mes, además de la relación de grosor/día

(ATR “absolute thickness ratio”) y un factor de reproducción ampliada (ABR “absolute breeding ratio”) que se le llamo a la relación cantidad de tallos/ha/día.

Los periodos de desarrollo fisiológico se determinaron por los cambios de pendiente de las variables del crecimiento y fueron utilizados para la estimación de los grados día de crecimiento (GDC).

Par obviar los supuestos de la estadística clásica los datos fueron procesados con técnicas no paramétricas para lo que las temperaturas fueron transformadas en variables ordinales agrupándolas en 5 clases cuyos límites eran calculados por división directa de la escala en 5 grupos distribuidos a intervalos iguales. La significancia entre grupos se estableció mediante un análisis de varianza de clasificación por rangos de Kruskal-Wallis (H).

$$H = \frac{12}{N(N+1)} \sum \frac{R_j^2}{n_j} - 3(N+1)$$

Dónde: K = Numero de muestras.

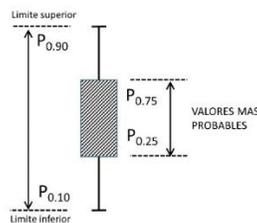
n_j = Número de casos de la muestra de orden j.

N = Número total de casos de todas las muestras combinadas.

R_j = Suma de rangos en la muestra de orden j.

El grado de significancia se obtenía de la distribución χ^2 ya que está probado que el valor de H se distribuye como χ^2 con grados libertad de K-1.

Los resultados son mostrados en gráficos de caja y bigote elaborados para cada grupo de temperatura, donde los límites se establecían a partir de los percentiles: $P_{0.10}$ y $P_{0.90}$ para los bigotes, asumiendo el 10% de error y $P_{0.25}$ y $P_{0.75}$ para las cajas asumiendo que en ese rango se encuentran los valores de ocurrencia más probables; como valor central para cada rango se utilizó la mediana ($P_{0.50}$).



También se utilizaron técnicas de regresión simple y modelos lineales discontinuos.

En total fueron procesadas 2538 observaciones mensuales, realizadas en 171 cosechas que por variedad y cepa se muestran en la tabla 1.

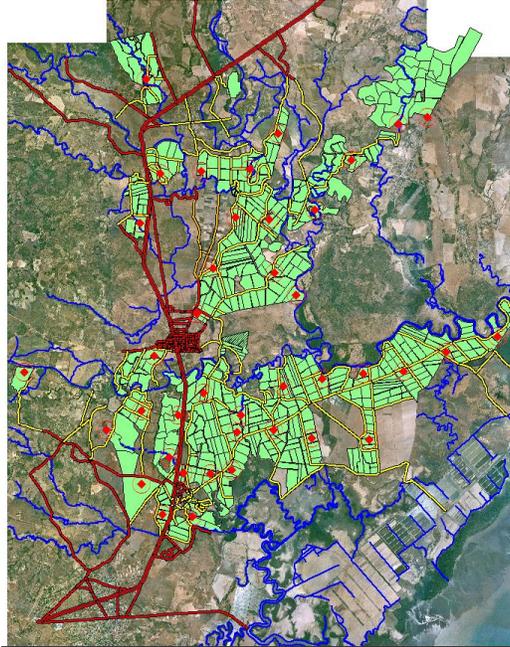
Tabla 1.

Puntos de observación permanente – Cosechas por variedad y cepa

| Variedad | Cepas (Número de cortes) | | | | | | | | | Total |
|------------|--------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| | 00-R | 01-R | 02-R | 03-R | 04-R | 05-R | 06-R | 07-R | 08-R | |
| BT-7742 | 4 | 37 | 30 | 7 | 4 | 3 | 3 | 2 | 3 | 83 |
| B-74-125 | 3 | - | 5 | 15 | 23 | 15 | 12 | 11 | 3 | 78 |
| B-80-689 | 10 | 22 | 20 | 11 | - | - | - | - | - | 54 |
| Variedades | 7 | 8 | 3 | 7 | 3 | - | - | - | - | 24 |
| Ragnar | - | 4 | - | 4 | - | - | - | - | - | 8 |
| DB-7160 | - | - | - | 3 | 4 | - | - | - | - | 7 |
| Total | 20 | 34 | 28 | 40 | 30 | 15 | 12 | 11 | 3 | 171 |

Figura 1.

Distribución Geográfica de los puntos de observación permanente (POP, en rojo)

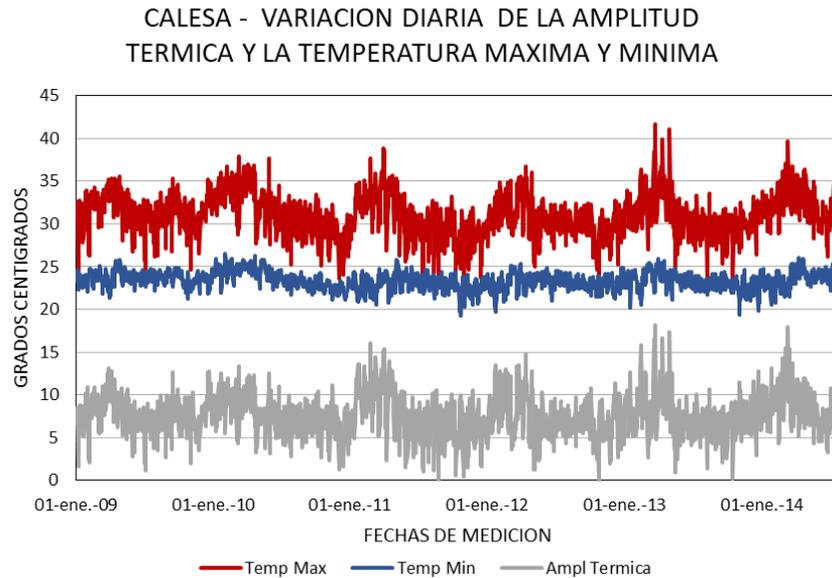


RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el análisis de la data se pudo comprobar que la temperatura es muy variable y su comportamiento es estacionario. Las mayores diferencias se observan entre meses, aunque también hay diferencias entre años, incluso pueden observarse diferencias entre días consecutivos que sobrepasan los 8 °C para las máximas, que es donde se aprecian las mayores variaciones, (figura 2) sin relación alguna con las mínimas, mucho más estables y donde las diferencias entre días consecutivos no superan los 3 grados.

Figura 2.

Variación diaria de amplitud térmica y la temperatura máxima y mínima en CALESA en el periodo comprendido de enero de 2009 a diciembre de 2014.



Estas variaciones (diarias) son aleatorias y no guardan relación con el año o el mes, pudiendo considerarse como el resultado casual de la interacción directa de la temperatura con la cantidad y duración de la lluvia, el grado de nubosidad y/o el viento, entre otras.

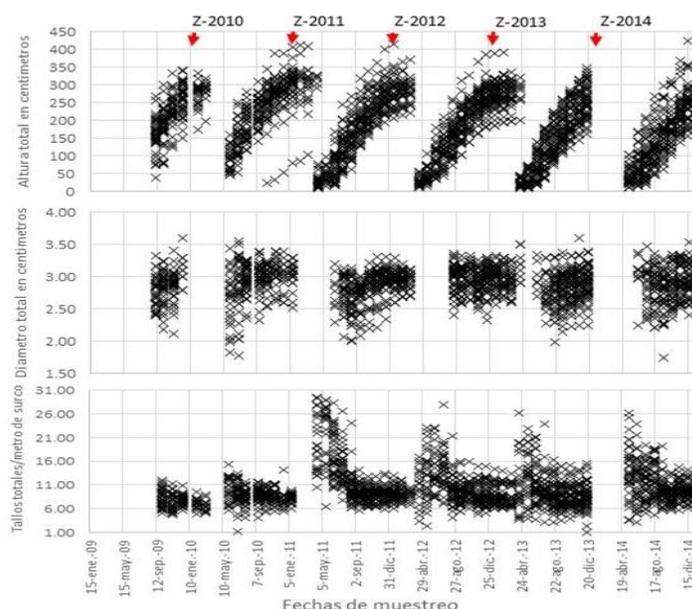
Aunque la temperatura promedio anual alcanzada fue de 27.9 ± 1.4 °C las máximas variaron entre 41.6 y 21.3 °C y las mínimas entre 26.5 y 19.2 °C. El mes más caluroso del año es abril, mes en que la temperatura comienza a descender hasta noviembre, que es el mes más fresco. La amplitud térmica promedio es de 7.7 °C aunque ha llegado a los 18.2 grados, asociada con el aumento de la temperatura máxima.

El crecimiento de la caña de azúcar resulto también estacional y muy variable (figura 3), con un promedio anual de altura de 309.8 ± 53.6 cm; los meses de mayor crecimiento son Junio – Julio – Agosto y Septiembre con crecimientos que pueden llegar hasta 1.5 cm/día. El diámetro por su parte se incrementa mensualmente y su mayor valor se presenta poco antes de la cosecha (3.18 ± 0.1 cm promedio) mientras que el mayor número de tallos por metro

lineal de surco se observa en los meses de abril, mayo y junio, cuando empiezan a disminuir para estabilizarse en septiembre – octubre hasta valores de 8.9 ± 1.2 tallos/metro que como promedio son los que llegan a cosecha.

Figura 3.

Variación diaria de la altura total, el diámetro y los tallos por metro en CALESA en el periodo comprendido de enero de 2009 a diciembre de 2014.



Todos estos valores son circunstanciales y están afectados, por los niveles de humedad del suelo, el genotipo y las condiciones de cultivo en cada punto específico.

Cuando se analizó el efecto de cada rango de temperatura sobre el crecimiento mensual del tallo se pudo observar que este aumenta hasta un punto en que comienza a disminuir, este análisis resulto significativo, tabla 3 y figura 4 y cuando esta relación se modela mediante una regresión polinomial de 2do grado se obtiene:

$$y = -4.4923x^2 + 248.6x - 3404.3$$

Pudiendo establecerse como:

- La TEMPERATURA BASE 24.8 °C (temperatura en la que el crecimiento es muy bajo o se detiene, $y = 0$).
- La TEMPERATURA OPTIMA 27.7 °C (en la que se alcanza el máximo crecimiento, $y = \max$) y como
- La TEMPERATURA MÁXIMA, critica, 30.5 °C en la que se produce un estrés por temperatura y el crecimiento se reduce al mínimo o se detiene ($y = 0$).

Tabla 3.

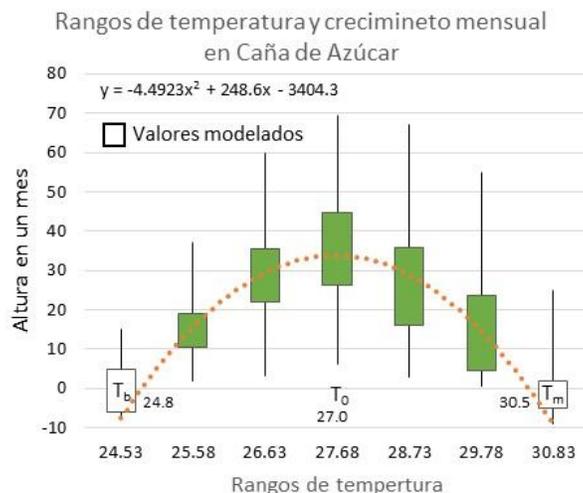
*Prueba de Kruskal-Wallis para altura/mes
por rangos de temperatura promedio
mensual*

| <i>Rangos de Temperatura</i> | <i>Tamaño Muestra</i> | <i>Rango Promedio</i> | <i>Mediana</i> |
|----------------------------------|---------------------------|---------------------------|----------------|
| < 25.58 | 28 | 310.589 | 15.00 |
| 26.63 | 262 | 732.807 | 29.45 |
| 27.68 | 603 | 922.066 | 36.00 |
| 28.73 | 350 | 652.364 | 24.95 |
| > 28.73 | 210 | 339.552 | 12.05 |

Estadístico H = 348.095 Valor-P = 0

Figura 4.

Modelo que describe el comportamiento de la altura del tallo de caña de azúcar en relación a la temperatura media. Datos mensuales de 40 POP en CALESA (2009 – 2014).



La variación intercuartilica para la altura de los tallos, es alta, como muestran los gráficos de caja y bigote, lo que se debe al efecto que sobre esta variable ejercen además de la temperatura otros factores (genéticos, biológicos, edafológicos, climáticos, agrotécnicos, antropogénicos, etc.) y sus interacciones, que no pueden ser fácilmente segregados en los estudios desarrollados en campos comerciales, produciendo un sesgo que los hace menos precisos, aunque más representativos y confiables al estar sometidos a las condiciones de producción.

Resultados similares han sido reportados para Colombia (Larrañondo, et al, 1995) donde, se aceptan como óptimas las temperaturas medias entre 25 y 26.5°C, con una fluctuación entre 19 como mínima y 30 como máxima. Se ha observado además que por debajo de los 19°C se alarga el periodo vegetativo y que por encima de 32.3°C su crecimiento se detiene. En otros entornos como Pakistán se reporta un óptimo crecimiento a temperaturas de 45°C, mientras que en Egipto afirman que las temperaturas superiores a los 35°C producen un aumento de la fotorespiración y como consecuencia la fotosíntesis neta disminuye por lo que el proceso fotosintético se reduce y junto con ella el rendimiento de la planta y ya por encima de 36°C la planta presenta síntomas de marchitez, a pesar de disponer de riego.

Cuando se analizó la relación de la altura mensual con el resto de las variables independientes (temperaturas máximas y mínimas y amplitud térmica) se obtuvieron resultados significativos y similares para la máxima y la mínima, aunque la relación con esta última fue menor; (Tabla 4 – 5), siendo cuasi lineal para la amplitud térmica (Figura 6) presumiblemente por no contar con diferencias menores de 5 °C entre las temperaturas máximas y mínimas.

Esta relación sugiere que con una amplitud térmica superior a los 7 grados Celsius el crecimiento de la caña comienza a disminuir y con diferencias de temperatura mayores a 11 °C el mismo se detiene. Resultados similares han sido reportados por Larrahondo, J.E, (1995) que encontró que entre 11 y 12 °C se estimula el almacenamiento de sacarosa ya que estas diferencias ejercen una marcada influencia sobre la reducción de la tasa de crecimiento vegetativo y el enriquecimiento de azúcar de la caña por hectárea por año (con 14 % de sacarosa, 14 % de fibra y de 2 % de otros productos solubles). Humbert R.P. (1970); Chaves Solera M.A. (1982); Duarte Álvarez, et al (2019), entre otros han reportan efectos similares.

| Tabla 4. | | | |
|--|----------------|----------------|---------|
| <i>Prueba de Kruskal-Wallis para Altura/Mes por rangos de temperatura mínima</i> | | | |
| Temperatura mínima | Tamaño Muestra | Rango Promedio | Mediana |
| < 22.49 | 188 | 634.303 | 25.90 |
| 22.94 | 323 | 710.033 | 29.00 |
| 23.4 | 482 | 760.612 | 31.90 |
| 23.85 | 375 | 788.58 | 30.00 |
| > 23.85 | 85 | 534.224 | 20.00 |
| Estadístico (H)= 38.8174 Valor-P = 7.59 E-8 | | | |

Figura 5.

Modelo que describe el comportamiento de la altura del tallo de caña de azúcar en relación a la temperatura mínima.

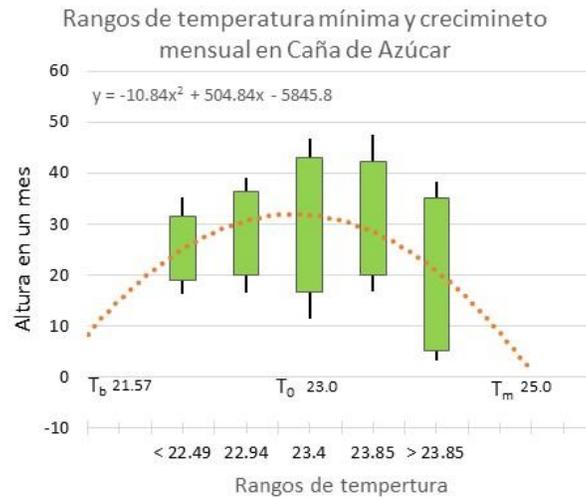


Tabla 5.

Prueba de Kruskal-Wallis para Altura/Mes por rangos de temperatura máxima

| Temperatura máxima | Tamaño Muestra | Rango Promedio | Mediana |
|---|----------------|----------------|---------|
| < 28.28 | 101 | 572.124 | 24.50 |
| 29.67 | 392 | 898.672 | 35.00 |
| 31.06 | 636 | 801.82 | 31.00 |
| 32.45 | 183 | 567.53 | 23.00 |
| > 32.45 | 141 | 230.152 | 7.30 |
| Estadístico (H) = 323.75 Valor-P = 0 | | | |

Figura 6.

Modelo que describe el comportamiento de la altura del tallo de caña de azúcar en relación a la temperatura máxima.

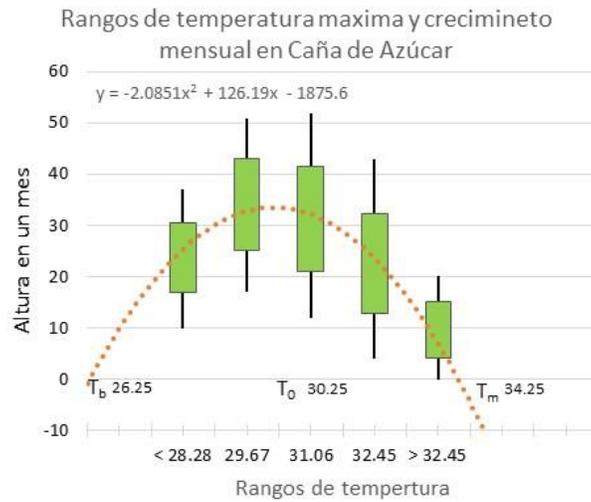


Tabla 6.

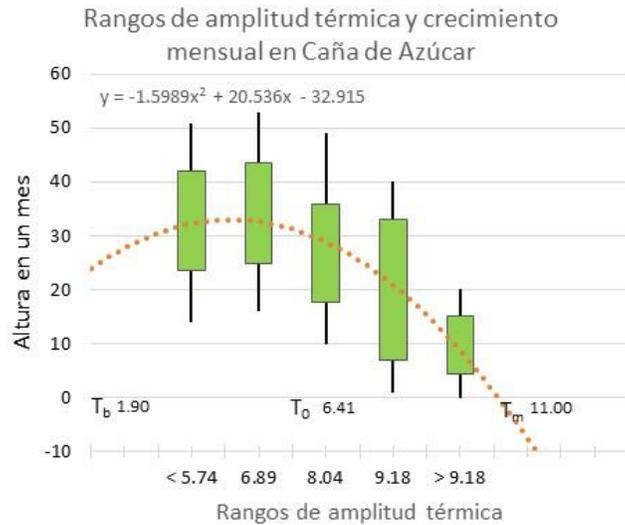
Prueba de Kruskal-Wallis para Altura/Mes por rangos de amplitud térmica

| Amplitud térmica | Tamaño Muestra | Rango Promedio | Mediana |
|------------------|----------------|----------------|---------|
| < 5.74 | 170 | 837.047 | 32.05 |
| 6.89 | 622 | 873.342 | 34.10 |
| 8.04 | 410 | 673.767 | 25.95 |
| 9.18 | 110 | 560.005 | 23.30 |
| > 9.18 | 141 | 233.826 | 8.00 |

Estadístico (H) = 306.178 Valor-P = 0

Figura 7.

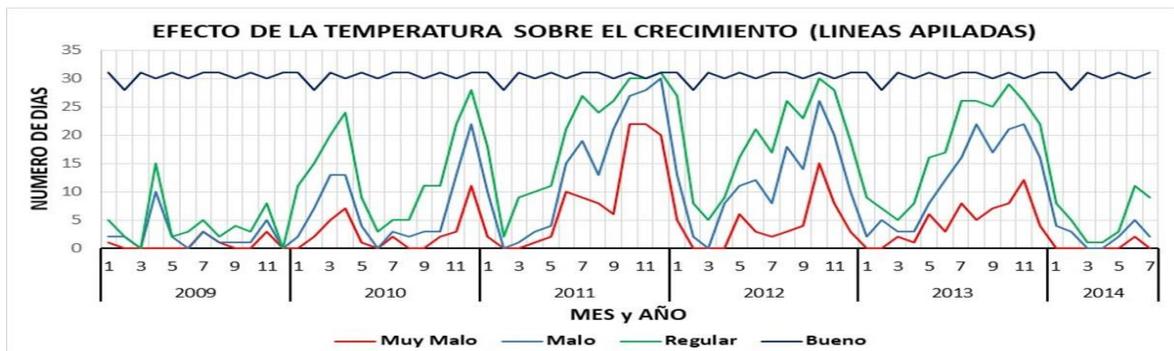
Modelo que describe el comportamiento de la altura del tallo de caña de azúcar en relación a la amplitud térmica.



Cuando se clasificaron los días de acuerdo con la temperatura promedio y su efecto sobre el crecimiento (figura 8) en días buenos (>80% del óptimo); regulares (40-80%); malos (0-40%) y muy malos ($\leq T_b$) se pudo observar que en general un 65 % fueron buenos, un 23.62 % fueron regulares y un 11.34 % fueron malos o muy malos, pero estos porcentajes variaron por años resultando en periodos unos mejores que otros (años buenos y años malos).

Figura 8.

Calidad y cantidad de días en función de la temperatura promedio diaria y su efecto sobre el crecimiento en caña de azúcar. (Líneas apiladas)



Por otra parte el efecto de la temperatura se manifiesta en dos direcciones: 1, sobre la duración de las fases de crecimiento; y 2, sobre la velocidad del crecimiento; de lo que se desprende que el mayor crecimiento y por ende la mayor producción se obtienen cuando se logra una alta velocidad de crecimiento (> 1.5 cm/día) con una mayor duración del gran periodo de crecimiento (GPC).

El cálculo de la duración de las fases de crecimiento (edad fisiológica) se realizó a partir de los GDC una vez estimada la T_b ; con ellos (GDC) y la altura acumulada se establecieron las cantidades de calor necesarias para lograr los cambios de fase del cultivo, sobre la base de considerar que los cambios en la pendiente de la curva están asociados al comienzo de cada fase.

El procedimiento utilizado con este fin consistió en calcular un modelo de regresión de la altura acumulada total en función GDC, posteriormente se estimaron las rectas tangentes en los puntos de cambio de pendiente y con ellas los puntos de intersección donde se considera cambian las etapas fisiológicas (figura 8).

Este procedimiento difiere del reportado por Yang et al, 1995; Oliveira, 1998; Salazar-Gutiérrez et al, 2013, que utilizaron, para calcular la temperatura base, métodos estadísticos como la menor varianza (VAR) en GDC, la menor desviación estándar (SD), la menor SD en días, el menor coeficiente de variación (CV) y regresión lineal, utilizando el coeficiente de regresión y los métodos de intercepto en X dentro de la fase fisiológica analizada; definidas por los cambios fisiológicos observados en el cultivo.

En este caso el modelo de mejor contraste fue un polinomio de 4to grado que describía el proceso con un 76 % de ajuste y a partir del cual se obtuvieron las rectas tangentes en los puntos de cambio.

$$\begin{aligned} \text{Altura} = & 24.3087 - 0.135882 * \text{GDC} + 0.00123554 * \text{GDC}^2 - 0.00000117853 \\ & * \text{GDC}^3 + 3.31647E - 10 * \text{GDC}^4 \end{aligned}$$

$$(R^2= 0.7646; F= 1318.67; \alpha = 0.0000; \sigma = 34.48)$$

Los modelos de las tangentes obtenidas fueron:

Ahijamiento: $y = 0.121x + 21.29$

Gran Periodo de Crecimiento: $y = 0.3453x - 34.36$

Maduración: $y = 0.0594x + 215.56$

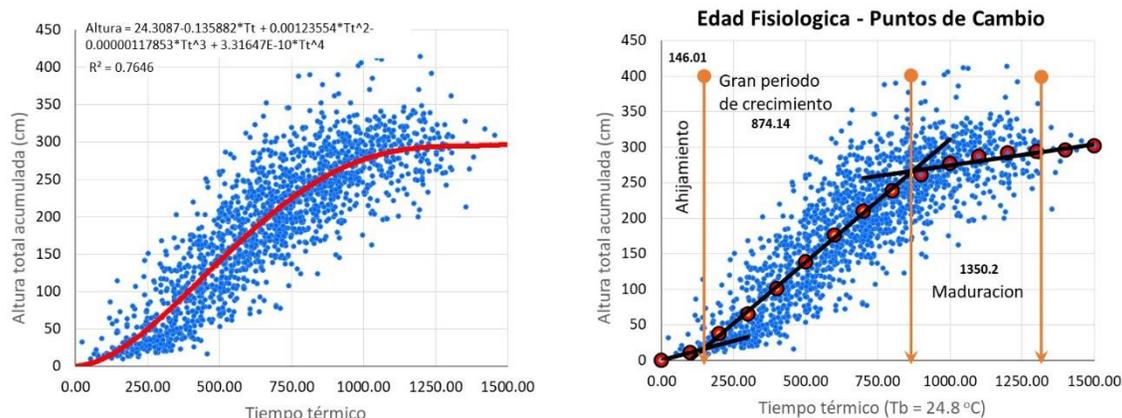
Y los puntos de cambio (puntos de corte de las tangentes):

- 248.24 GDC, desde que la caña se cosecha hasta terminado el ahijamiento.
- 880.95 GDC, desde que la caña se cosecha a que comienza la maduración.
- 1131.5 GDC desde que la caña se cosecha a que termina la maduración; calculando la energía total necesaria para 365 días a 27.9 °C – 24.8 °C, (temperatura anual promedio – temperatura base) asumiendo caña cortada con 12 meses de edad.

Resultando 248.24 GDC para el ahijamiento; 631.81 GDC para el gran periodo de crecimiento y 250.55 GDC para la maduración.

Figura 9.

Relación entre la altura total de los tallos y los GDC (tiempo térmico); a la izquierda; a la derecha tangentes y puntos de cambio de pendiente utilizando un modelo lineal discontinuo.



Cuando se calcularon los GDC necesarios en cada periodo fisiológico con las diferentes causas de variación (tabla 7) se obtuvieron valores variables, sobre todo para el periodo comprendido desde el corte hasta el ahijamiento, presumiblemente afectado, además del genotipo, por el tiempo que demora la brotación y el cierre de campo ya que como se sabe el ahijamiento en caña de azúcar es consecuencia directa de la incidencia del sol y comienza a

controlarse (disminuir) cuando el follaje impide la penetración de los rayos solares, lo que demora más en suelos afectados por factores limitantes donde el cultivo crece menos y/o en campos despoblados. Independientemente, contados desde el momento del corte, 248.24 ± 96.63 parece ser el tiempo térmico (GDC) que la caña necesita para concluir el ahijamiento.

La baja variación observada en función de la clase agrícola del suelo se debe a que la calidad del suelo no influye directamente sobre la temperatura del aire y la alta variación entre variedades puede deberse a diferencias en la T_b , que puede ser distinta para cada genotipo, lo que ha sido reportado por Trudgill et al, 2005, aunque no pudo ser demostrado en este trabajo, donde las diferencias en T_b entre genotipos no resultaron significativas.

Tabla 7.

Afectaciones en la duración absoluta del ahijamiento (a la izquierda) y el gran periodo de crecimiento (a la derecha) medidas en términos de tiempo térmico (GDC)

| Causa de Variación | GDC para ahijamiento | | | GDC para gran periodo | | |
|--------------------|----------------------|--------|--------|-----------------------|--------|--------|
| | Media | DS | CV% | Media | DS | CV% |
| Año | 294.29 | 146.68 | 49.80% | 865.57 | 110.21 | 12.80% |
| Variedad | 203.81 | 52.77 | 40.60% | 870.54 | 72.14 | 8.30% |
| Clase Agrícola | 227.18 | 49.69 | 19.70% | 883.7 | 37.54 | 4.20% |
| Mes de corte | 267.68 | 137.39 | 51.30% | 903.98 | 130.36 | 14.40% |
| Promedio | 248.24 | 96.63 | 40.40% | 880.95 | 87.56 | 9.93% |

La energía necesaria para concluir el gran periodo de crecimiento se muestra mucho más estable y se ubica en alrededor de 880.95 ± 87.56 GDC con CV mucho más bajo (9.9%) y dentro de los límites de error aceptables para este estadígrafo.

Otra forma que puede ser usada para analizar efecto de la temperatura sobre el crecimiento y el desarrollo es en función de la velocidad con que crece la planta (“absolute growth rate”, AGR) que se define como el crecimiento por unidad de tiempo, es decir.

$$AGR = g/t$$

Donde:

$$AGR = \text{Velocidad de crecimiento (cm/día)}$$

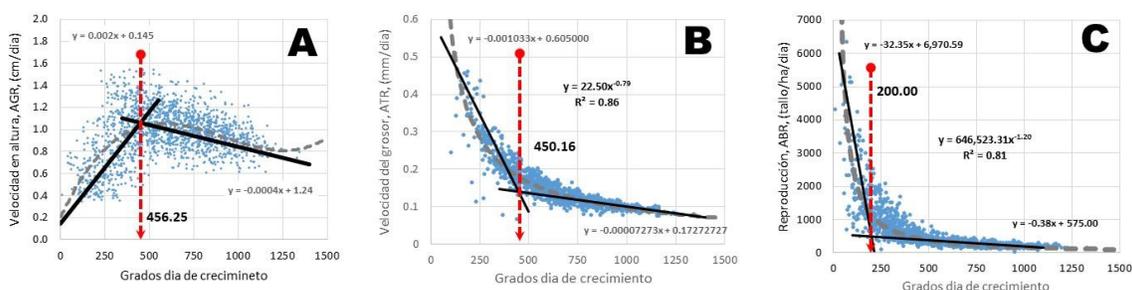
g = Altura del tallo hasta el 1er dewlap visible, o diámetro en el centro del tallo, o tallos por hectárea.

t = tiempo desde el momento de corte o siembra hasta el momento “g”

Las figuras 6a, 6b y 6c muestran estas relaciones.

Figura 10.

Relación entre la velocidad de crecimiento en altura (A), grosor (B) y reproducción de tallos por hectárea por día (C) y los grados día de crecimiento. CALESA, POP, 2009 -2014 .



Como se aprecia la velocidad con que se incrementa la altura (6A) va en aumento a razón de 2 mm/GDC ($y = 0.002x + 0.145$) hasta los 456 GDC cuando alcanza la máxima velocidad (1.06 cm/GDC) y empieza a disminuir a razón de 0.4 mm/GDC ($y = -0.0004x + 1.24$) hasta 1131 GDC en que la planta se corta. El hecho de que en esta zona, al momento del corte, la planta esté creciendo aun a razón de 0.79 cm/GDC fundamenta el uso de maduradores u otro método para detener el crecimiento y obligar a la planta a concentrar azúcares.

Para el grosor (6B) la relación también se divide en dos partes pero ambas desaceleran; la primera a mayor velocidad ($y = -0.001033x + 0.605000$) hasta los 450 GDC en que prácticamente se estabiliza entre 0.14 y 0.07 mm/GDC al momento del corte ($y = -0.00007273x + 0.1727$).

En la reproducción ampliada (tallos/ha/día) se observa la misma tendencia que para el grosor dividiéndose la gráfica en dos partes a los 200 GDC, tiempo en que va concluyendo el ahijamiento cuando llegan a multiplicarse a razón de 500 tallos/ha/día ($y = -32.35x + 6,970.59$) hasta valores de 0 tallos/ha/GDC pasados los 1000 GDC. Esta caída es más

pronunciada debido a que el número de tallos con el tiempo va disminuyendo como consecuencia de la competencia por la luz.

En la gráfica 10, se destacan dos aspectos importantes, 1: que la mayor dispersión de datos se observa en la altura del tallo, lo que se debe a que en esta variable es donde se concentra el mayor efecto de los factores concomitantes y 2: que la caña incrementa su velocidad de crecimiento hasta un punto crítico que se alcanza a los 450 GDC y es antes de llegar a ese punto cuando habría que intervenir para garantizar las condiciones óptimas y alcanzar el máximo crecimiento y producción.

Otro aspecto interesante es que utilizando 200 GDC como punto crítico del ahijamiento se puede inferir que realizando una labor de aporque anterior a este momento se puede aumentar el tiempo del gran periodo de crecimiento, además de redirigir energía hacia esa etapa lo que debería aumentar la velocidad de crecimiento y con ello el rendimiento y la producción. Además: comparando las velocidades de crecimiento reales con las teóricas (estándares) se puede deducir con bastante anterioridad si hay afectaciones y corregirlas y/o tomarlas en cuenta.

CONCLUSIONES

1. A pesar del conocimiento que se tiene de la importancia de la temperatura en el crecimiento y el desarrollo de los cultivos, en el caso de los cultivos comerciales de fondo industrial, con grandes extensiones de área, esta no se toma en cuenta ni en la evaluación de la producción ni en la planeación de las actividades culturales.
2. La variabilidad inducida en la temperatura por el cambio climático causa efectos negativos y significativos en el crecimiento y por ende en la producción de la caña de azúcar, al punto que en el periodo estudiado el 35% del tiempo, como promedio, resultado de regular a malo para el cultivo, observándose una tendencia al incremento en los últimos años.
3. La relación de la temperatura con el crecimiento esta expresada en el modelo cuadrático " $y = -4.4923x^2 + 248.6x - 3404.3$ "; a partir de este modelo se calculó la temperatura base ($T_b = 24.8$ °C), la temperatura optima ($T_o = 27.7$ °C) y la

temperatura máxima ($T_m = 30.5 \text{ }^\circ\text{C}$). Temperaturas por debajo de 24.8 y por encima de 30.5 $^\circ\text{C}$ pueden detener el crecimiento.

4. Con el tipo de utilización de la tierra promedio de CALESA, en las condiciones del arco seco de Panamá, la caña de azúcar puede crecer hasta 1.5 cm/día en el gran periodo de crecimiento si las temperaturas son óptimas.
5. Al igual que el enyerbamiento, las plagas y enfermedades o el riego entre otros la temperatura promedio diaria debe ser un factor a tomar en cuenta a la hora de analizar el nivel de producción esperada ya que al igual que los otros afecta significativamente el crecimiento.
6. Los cálculos de los tiempos térmicos (GDC) resultaron en 248.24 GDC, desde que la caña retoña hasta terminado el ahijamiento; 880.95 GDC, desde que termina el ahijamiento a que comienza la maduración y 1131.5 GDC hasta que termina la maduración lo que representa una duración de 248.24 GDC para el ahijamiento, 631.81 para el GPC y 250.55 GDC para la maduración.
7. El margen óptimo de temperatura efectiva en la zona es de 3 $^\circ\text{C}$, si este se mantuviera constante el agricultor tendría unos (450 GDC/3 $^\circ\text{C}$) 150 días calendario para trabajar y obtener la máxima velocidad de crecimiento, las intervenciones posteriores a 450 GDC resultan mucho menos eficientes.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Chaves Solera Marco A (1982) LA MADURACION, SU CONTROL Y LA COSECHA DE LA CAÑA DE AZUCAR 1 MAG <https://servicios.laica.co.cr/laica-cv-biblioteca/index.php/Library/download/FAmCPeIHfQCIJhAhnzDdGwAStzOdssA>
- Dos Santos, A.C., J.L. Souza, I. Teodoro, G.V. Souza, G.M. Filho, R.A. Ferreira. (2008) Vegetative development and production of sugarcane varieties as a function of water availability and thermic units. *Ciênc. Agrotec.*, 32 (5): 1441-1448, 2008.
- Duarte Álvarez, Oscar Joaquín; Gonzalez Villalba Jorge Daniel (2019) Guía Técnica del cultivo de la caña de azúcar. San Lorenzo, Paraguay 2019. https://www.jica.go.jp/paraguay/espanol/office/others/c8h0vm0000ad5gke-att/gt_01.pdf

- Ellis, R. H., R. J. Summerfield, G. O. Edmeades, & E. H. Roberts, (1992) Photoperiod, temperature, and the interval from sowing to tassel initiation in diverse cultivars of maize. *Crop Sci.*, 32: 1225-1232
<https://doi.org/10.2135/cropsci1992.0011183X003200050033x>
- Larrahondo, J.E.; Villegas, F. (1995) Control y características de maduración. CENICAÑA. El cultivo de la caña en la zona azucarera de Colombia, Calí, 1995, 3-10
- Oliveira M. (1998) Cálculo de la temperatura base de brotación y floración para *Vitis vinifera* cv. Touriga Francesa en la región del Duero de Portugal. *Soy J. Enol Vitic.* 1998;49(1):74-78.
- Parra-Coronado, A., F. Gerhard, B. Chaves-Cordoba. The thermal time for Productive Phenological Stages of Pineapple. *Acta biol. Colomb.*, 20 (1): 163-173, 2015.
- Salazar-Gutierrez MR, Johnson J, Chaves-Cordoba B, Hoogenboom G. (2013) Relación de la temperatura base con el desarrollo del trigo de invierno. *Int J Planta Prod.* 2013;7(4):741-762.
- Tollenaar, M., T. Daynard, & R. Hunter, (1979) Effect of temperature on rate of leaf appearance and flowering date in maize. *Crop Sci.*, 19(1): 363-366
- Trudgill DL, Honek A, Li D, Van Straalen NM. (2005) Thermal time – Concepts and utility. *Ann Appl Biol.* 2005;146(1):1-14. Doi: 10.1111/j.1744-7348.2005.04088.x.
- Vásquez Condado Juan José (2017) Efecto del Clima en la Producción de Caña y Azucar en Central Progreso. <https://www.atamexico.com.mx/wp-content/uploads/2017/11/5.-AGRICULTURA-CA%C3%91ERA.pdf>
- Warrington, I. J., & E. Kanemasu, (1983) Corn growth response to temperature and photoperiod. I. Seedling emergence, tassel initiation, and anthesis. *Agron. J.*, 75(5): 749-754. <http://dx.doi.org/10.2134/agronj1983.00021962007500050008x>
- Yang S, Logan J, Coffey DL. (1995) Fórmulas matemáticas para el cálculo de la temperatura base de los grados día de crecimiento. *Agrícola para Meteorol.* 1995;74(1-2):61-74. Doi: 10.1016/0168-1923(94)02185-M