

VARIABLES PREDICTORAS PARA UN MODELO AGROMETEOROLÓGICO DEL RENDIMIENTO AGRÍCOLA DE LA CAÑA DE AZÚCAR

Regla Zaira Enrique-Estévez y Grethel Lázara Sieiro-Miranda*

Instituto de Investigaciones de la Caña de Azúcar (INICA). Carretera CUJAE Km. 1½, Boyeros. La Habana, Cuba.

*grethel.sieiro@inica.azcuba.cu

RESUMEN

El objetivo de esta investigación fue definir variables predictoras para un modelo de pronóstico del rendimiento agrícola de la caña de azúcar. Se conformó una base de datos con variables agrícolas y meteorológicas correspondientes a 13 unidades empresariales de base de las provincias de Cienfuegos, Sancti Spíritus y Ciego de Ávila, en el período comprendido entre 1980 y 2015. Se estudiaron 14 variables relacionadas con la productividad del cultivo, determinadas por el ambiente. Para el procesamiento estadístico de los datos se utilizó el software STATISTICA versión 8.0.5. En el período comprendido entre 1980 y 2015 el registro anual de rendimiento agrícola de la caña de azúcar mostró un decrecimiento de esta variable en el tiempo, un aumento de 7.5 % de la temperatura mínima y una disminución de las precipitaciones de 47.4 %. Existe una dependencia inversa de la temperatura y las precipitaciones con el rendimiento, y directa de esta variable con el índice potencial productivo y la edad de la plantación.

Palabras clave: cepa, caña de azúcar, índice potencial productivo, precipitaciones, temperatura.

ABSTRACT

The objective of this research was to define predictor variables for a prediction model of the agricultural yield of sugarcane. A database was created with agricultural and meteorological variables corresponding to 13 Base Business Units in the provinces of Cienfuegos, Sancti Spíritus and Ciego de Ávila in the period 1980-2015. Fourteen variables related to crop productivity determined by the environment were studied. For the statistical processing of the data, the STATISTICA version 8.0.5 software was used. In the period 1980 - 2015, the annual record of agricultural yield of sugarcane showed a decrease in this variable over time, a 7.5 % increase in minimum temperature and a 47.4 % decrease in rainfall. There is an inverse dependence of temperature and rainfall on yield, and a direct dependence of this variable on the potential productive index and the age of the crop.

Key words: stock, Sugarcane, Productive Potential Index, precipitations, temperature.

INTRODUCCIÓN

La agricultura cañera es altamente vulnerable a las variaciones climáticas, por lo que cambios meteorológicos impredecibles llevan a la planeación de estrategias conservadoras que sacrifican la productividad y provocan que el rendimiento difiera de una región a otra (1). La variable agrícola (rendimiento) depende de varios factores, entre los que destacan las variaciones del clima (2), las que a su vez dependen de las características físico-geográficas y estructurales de la región que se analice.

En Cuba, el rendimiento agrícola de la caña de azúcar se estima por el personal que trabaja en las unidades productoras de la gramínea (3) y es realizado sobre bases empíricas. Este estimado se aproxima a los millones de toneladas de caña que se prevé moler en una contienda que durará aproximadamente, entre 120 y 150 días. Sin embargo, un método multidisciplinario que sea capaz de establecer ese rendimiento, en función de las condiciones del suelo, del clima y el manejo de cepas, entre otras, humaniza el trabajo del pronosticador y hace más eficiente y rápida la toma de decisiones.

La modelación de esta variable agrícola (rendimiento), desde el punto de vista matemático, se realiza usualmente mediante métodos determinísticos. Estos métodos comprenden una relación sabida entre un dato recogido *in situ*, llamado predictando y de otros elementos conocidos como variables predictoras. Estos modelos constituyen una composición, en la que una relación estadística se basa en determinaciones físicas o matemáticas del proceso físico.

Las temperaturas y las precipitaciones son recomendadas, por varios autores, desde el punto de vista climático, para la modelación de rendimientos agrícolas, tanto en caña de azúcar como en otros cultivos (1; 3; 4; 5).

La obtención de un modelo del rendimiento agrícola azucarero permitirá simplificar la estimación y modelar el rendimiento agrícola con mayor precisión, pues se pasa de un método empírico a otro matemático; de ahí que el objetivo de esta investigación sea definir variables predictoras (meteorológicas y agrícolas) para un modelo de pronóstico del rendimiento agrícola de la caña de azúcar.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para determinar las variables predictoras de un posible modelo de pronóstico del rendimiento agrícola total de la caña de azúcar, para las provincias de Cienfuegos, Sancti Spiritus y Ciego de Ávila, se conformó una base de datos con variables agrícolas y meteorológicas correspondientes a 13 unidades empresariales de base (UEB) de las provincias de Cienfuegos, Sancti Spíritus y Ciego de Ávila (tabla 1), en el período comprendido entre 1980 y 2015.

Tabla 1. Unidades empresariales de base (UEB)

Provincia	UEB
Cienfuegos	Ciudad Caracas
	Antonio Sánchez
	14 de Julio
	Elpidio Gómez
	5 de Septiembre
Sancti Spíritus	Melanio Hernández
	Uruguay
Ciego de Ávila	Enrique Varona
	Ecuador
	Ciro Redondo
	Primero de Enero

Se estudiaron las variables meteorológicas: temperatura (mínima, máxima y media) y precipitaciones. Las variables agrícolas que se analizaron fueron: Índice potencial productivo (IPP), edad de la plantación, área total ocupada por el cultivo, área de cada cepa y su rendimiento. Para el cálculo del IPP se tuvo en cuenta el tipo de suelo (DAS), la evapotranspiración del cultivo (ETc), la profundidad radical (PR), el coeficiente de cultivo (Kc) y la disponibilidad de agua para este (DAC).

Los datos fueron tomados de la base patrimonial de datos del Instituto de Investigaciones de la Caña de Azúcar (INICA), de la Sala de Análisis Nacional del Grupo Azucarero AZCUBA y los registros, para el período de análisis, de siete estaciones meteorológicas (tabla 2), pertenecientes a la Red Nacional del Instituto de Meteorología (6), con atención a las recomendaciones de la Organización Meteorológica Mundial (OMM) en la Guía de Prácticas Meteorológicas (7).

Para el procesamiento estadístico de los datos se utilizó el software STATISTICA versión 8.0.5 y se implementó un código de programación en Python y el módulo SciPy para la interpolación de las variables.

Tabla 2. Estaciones meteorológicas representativas del área de estudio

Código	Provincia	Estación	Latitud	Longitud	Altitud (m)
335	Cienfuegos	Aguada de Pasajeros	22° 22' 22"	80°49' 35"	28.34
337	Sancti Spíritus	Trinidad	21° 46' 57"	79° 59' 20"	25.20
341	Sancti Spíritus	Jibaro	21° 44' 20"	79° 13' 57"	30.17
342	Sancti Spíritus	Topes de Collantes	21° 55' 10"	80° 00' 51"	767.33
344	Cienfuegos	Cienfuegos	22° 11' 25"	80 26' 39"	42.00
346	Ciego de Ávila	Venezuela	21° 45' 37"	78° 47' 51"	26.00
347	Ciego de Ávila	Camilo Cienfuegos	22° 09' 49"	78° 46' 13"	16.00

Fuente: (8).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis climatológico preliminar realizado a las provincias de Cienfuegos, Sancti Spíritus y Ciego de Ávila en el período comprendido entre 1980 y 2015 revela un comportamiento diferenciado de las variables meteorológicas en estudio (tabla 3). En concordancia, la provincia de Cienfuegos registró los mayores acumulados de precipitación, con una media anual de 1282.6 mm y temperaturas comprendidas entre los 19.5 °C y los 30.0 °C, con un comportamiento estacional. Sancti Spíritus no presenta una variabilidad significativa en cuanto al régimen de precipitaciones y registra un incremento de la temperatura mínima (T mín.), con respecto a Cienfuegos; mientras que Ciego de Ávila, revela los acumulados más bajos de precipitación. Por otro lado, no existen grandes diferencias entre los valores de temperaturas extremas en las provincias analizadas.

Tabla 3. Tendencia central de la temperatura y las precipitaciones en 30 años

Provincia	T mín. (°C)	T med. (°C)	T máx. (°C)	Precipitaciones (mm)
Cienfuegos	19.5	24.9	30.0	1282.6
Sancti Spíritus	18.2	26.4	31.9	1269.5
Ciego de Ávila	21.0	25.5	30.6	1082.6

Al comparar las variables en las provincias estudiadas, estas muestran una tendencia al aumento hacia el final del período, con diferencias estadísticamente significativas. Las temperaturas, máxima (T máx.) y mínima (T mín.) se incrementaron como promedio en 1.9 y 7.5 %, respectivamente; mientras que las precipitaciones disminuyeron en igual período, lo que se puede atribuir a variaciones ocasionadas por el cambio climático, que afectan de manera directa el crecimiento y desarrollo del cultivo (figura 1).

El aumento de la temperatura, fundamentalmente la mínima, produce una disminución en los valores de amplitud térmica (AT). La reducción en los registros de esta variable produce un efecto negativo en la acumulación de sacarosa del cultivo de la caña de azúcar, según lo informado por (9), que plantea para la región occidental de Cuba, condiciones similares a las obtenidas en esta investigación.

En cada campaña azucarera, el rendimiento agrícola total por UEB se consolida, una vez que se analizan los rendimientos por cepa, según la época de plantación y las hectáreas de caña que fueron cosechadas. La dinámica de este, muestra tres momentos de inflexión; desde 1980 hasta aproximadamente el año 2000, con una tendencia marcada a la disminución; la década de los 2000 muestra un comportamiento estable que oscila entre 30 y 40 t ha⁻¹ y luego una tendencia al incremento de la variable, en el último lustro del período analizado (figura 2). Estas tendencias pueden estar motivadas por razones logísticas y de tipo administrativo en la industria azucarera cubana.

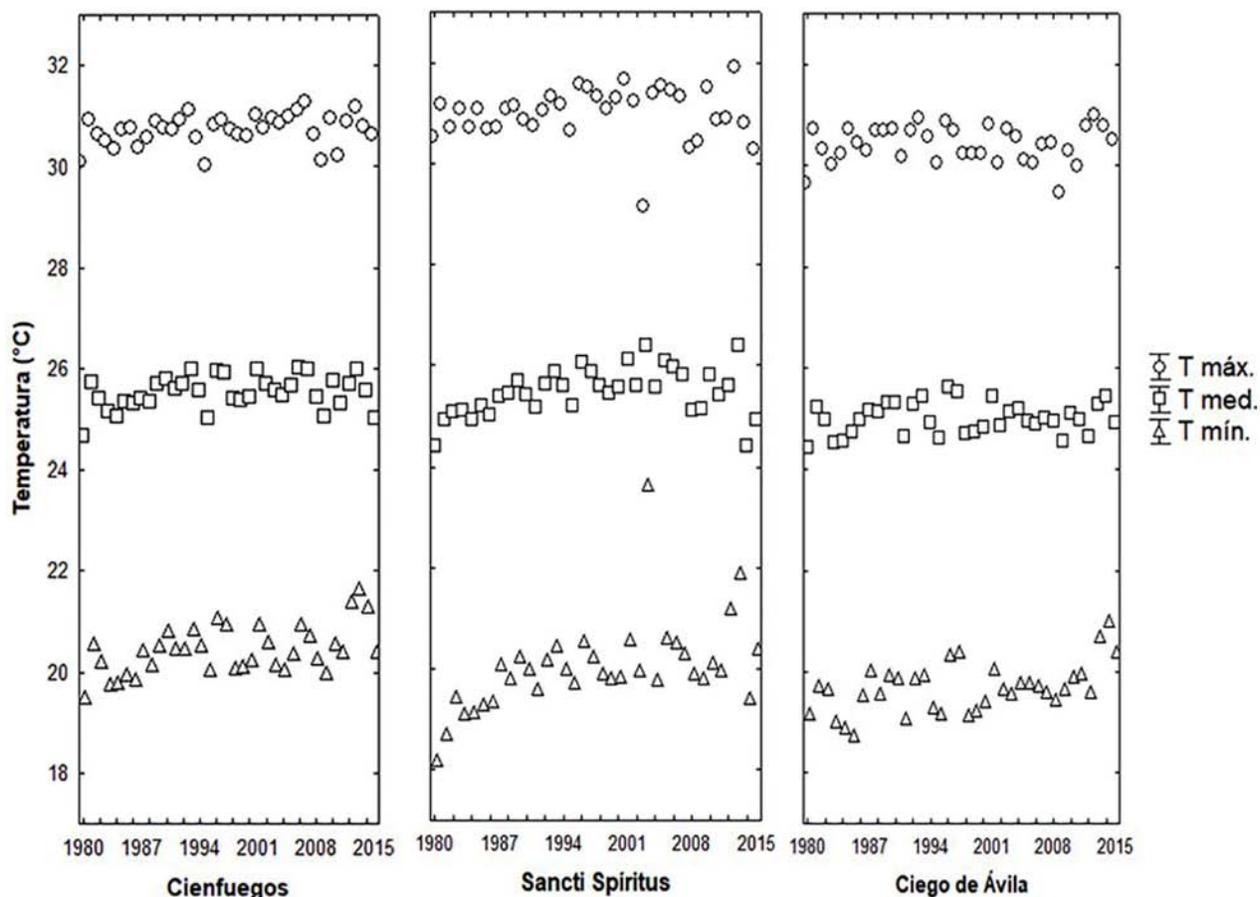


Figura 1. Comportamiento de la temperatura en las provincias de Cienfuegos, Sancti Spíritus y Ciego de Ávila, en el período comprendido entre 1980 y 2015.

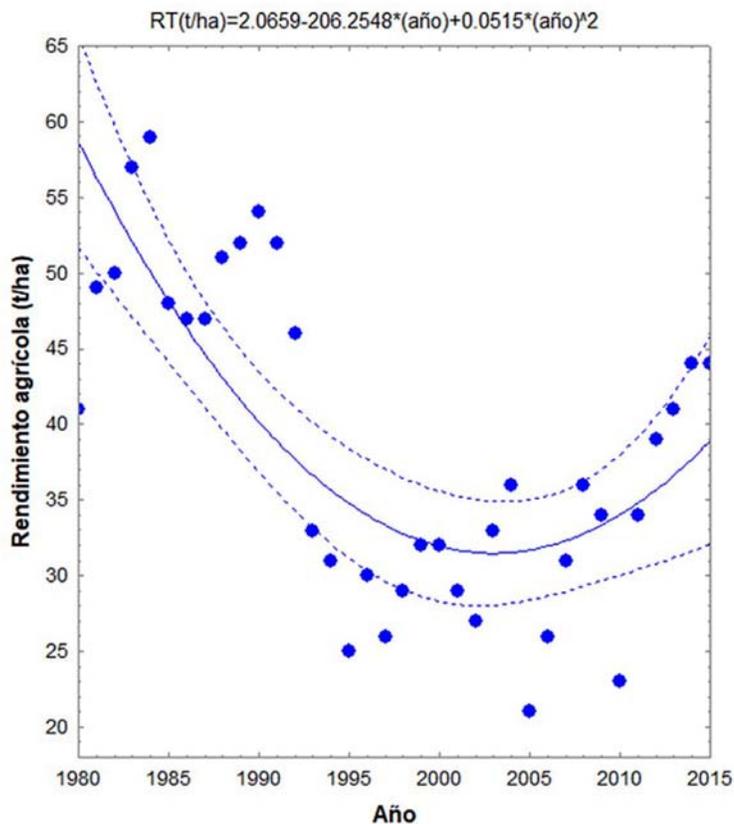


Figura 2. Comportamiento medio del rendimiento agrícola promedio de la caña de azúcar en las provincias estudiadas, en el período comprendido entre 1980 y 2015. Líneas discontinuas indican intervalos de confianza a 0.95.

Este comportamiento se ajusta a un modelo cuadrático, con una significación del 5 % y común para las tres provincias. Aun cuando esta relación no se corresponde con una respuesta fisiológica del cultivo, su condición de modelo empírico, según las definiciones brindadas por Gálvez (10), permite una comprensión general del comportamiento del rendimiento agrícola para las provincias estudiadas. Esta relación no constituye un modelo predictivo sino solamente descriptivo de las variaciones de la variable en el tiempo y puede estar influido por el factor humano, asociado a la producción agrícola e industrial del cultivo.

Los valores inferiores a los registrados en otros países productores de azúcar se asocian a variaciones climáticas y de manejo del cultivo. La inadecuada aplicación de agroquímicos y el cambio de las prácticas de manejo en los suelos cañeros, sumado al aumento de la temperatura y la severa disminución de las precipitaciones, ocasionan un efecto negativo en el rendimiento real y esperado de cultivos como la caña de azúcar (11). El uso del riego no satisface las demandas del cultivo, debido a la poca área bajo este sistema de producción. Estos resultados muestran la importancia de conocer la dependencia de esta variable de los elementos climáticos, para hacer más eficiente la estimación del rendimiento potencial que se espera y avanzar hacia una agricultura climáticamente sostenible.

El análisis de correlación entre las variables meteorológicas y el rendimiento mostró una relación inversa entre este y las precipitaciones en las provincias de Cienfuegos, Sancti Spiritus y Ciego de Ávila; y una dependencia estacional que explica el 50 % del rendimiento real. Varios autores plantean que la distribución de las lluvias determina, en la mayoría de los casos, la cosecha y producción de un cultivo y consideran que una precipitación total de 1500 a 1700 mm en un año y alrededor de 100 mm cuatro semanas antes de la cosecha, es una distribución adecuada para suplir las necesidades hídricas de la caña de azúcar (3; 12).

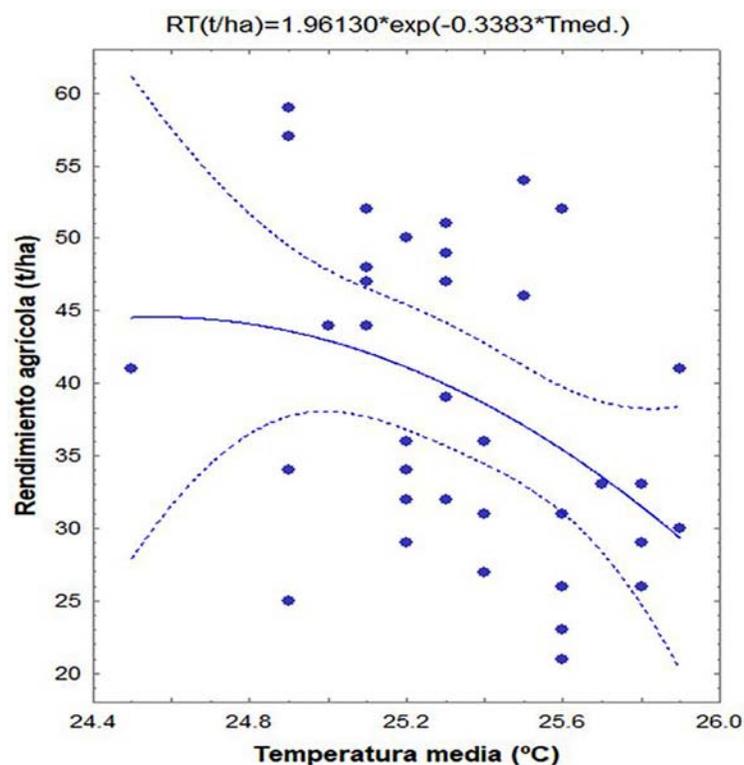


Figura 3. Relación entre el rendimiento agrícola de la caña de azúcar y la temperatura media en la región estudiada, en el período comprendido entre 1980 y 2015. Líneas discontinuas indican intervalos de confianza a 0.95.

Al analizar la relación con las temperaturas, un aumento en esta última variable supone una reducción exponencial en los rendimientos agrícolas para las condiciones de la investigación, debido a retrasos en el crecimiento. Esta relación con un $r = -0.3947$ (figura 3), aun cuando no supera el 50 % de la explicación de la varianza del predictando (rendimiento) su significación sugiere que esta influye en él, pero no de manera aislada. Estos resultados refuerzan lo planteado por Gálvez (3) y González (13), al valorar la utilización de combinaciones entre las variables climáticas y agrícolas.

El IPP presentó una correlación poco significativa, lo que sugiere que las características de los suelos agrícolas cultivados con caña de azúcar influyen más sobre el IPP que el régimen hídrico de la zona de estudio. Sin embargo, este determina las afectaciones que puede sufrir la planta en el período de crecimiento por estrés hídrico (14).

Con respecto a la edad de la plantación, esta se ajusta a un modelo cuadrático con un coeficiente de correlación de 0.6784 altamente significativo ($p < 0.05$). En el período

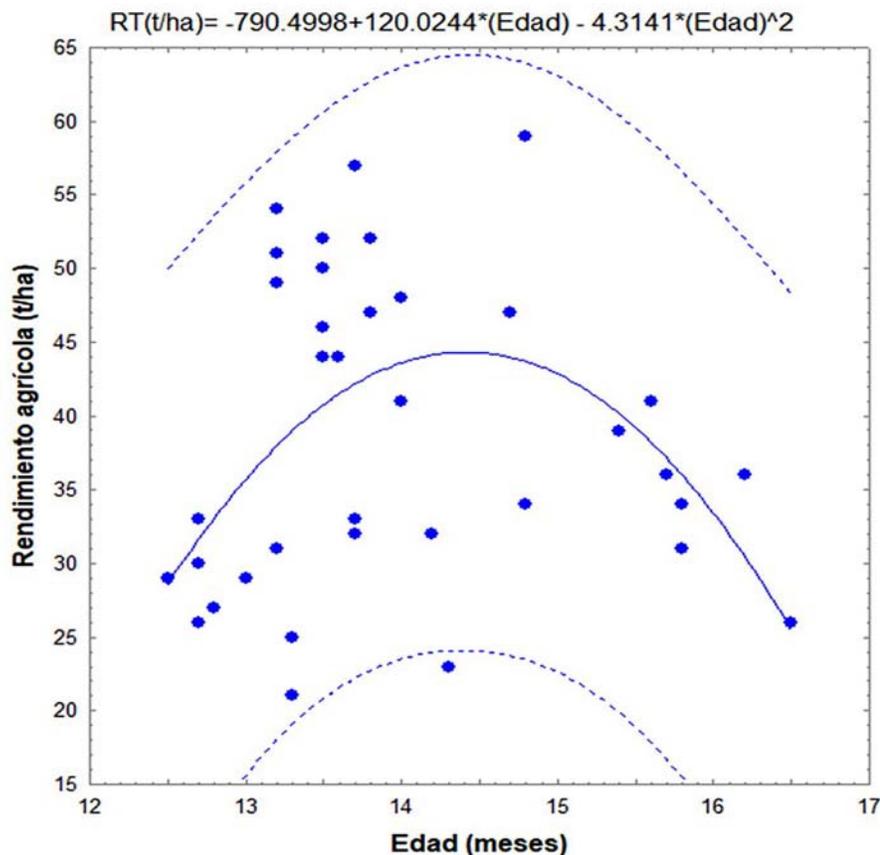


Figura 4. Relación entre el rendimiento agrícola promedio de la caña de azúcar y la edad de plantación en la región, en el período comprendido entre 1980 y 2015. Líneas discontinuas indican intervalos de confianza a 0.95.

que la estrategia de cosecha no se correspondió con el potencial azucarero de los cultivares (16). Investigaciones informan que las variables de mayor peso en las pérdidas sobre el rendimiento potencial de la caña de azúcar, en las variedades comerciales en la zafra comprendida entre 2015 y 2016, fueron los desfases y las precipitaciones (17).

CONCLUSIONES

En el período comprendido entre 1980 y 2015, el registro anual de rendimiento agrícola de la caña de azúcar mostró un decrecimiento en el tiempo, un aumento de 7.5 % de la temperatura mínima y una disminución de las precipitaciones de 47.4 %.

Existe una dependencia inversa de la temperatura y las precipitaciones con el rendimiento, y directa de esta variable con el índice potencial productivo y la edad de la plantación, entre los 12 y 17 meses.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Arias, E.S. Diagnóstico de rendimientos de caña de azúcar utilizando factores climatológicos múltiples. Tesis para optar por el título de Ingeniero en Administración de Agronegocios. Escuela Agrícola Panamericana de Zamorano, Honduras. 2008. 28 p.

comprendido entre 1980 y 2015 la tasa de respuesta del rendimiento agrícola real en relación con la edad superó en el decimoquinto mes las 58 t ha⁻¹, con un mínimo de 20 t ha⁻¹ en el decimotercero; estos sugieren que, en la zona del país estudiada, son aquellas cepas con edades entre 14 y 16 meses (primaveras, socas y fríos) las que alcanzaran resultados superiores en cuanto a rendimiento (figura 4).

La rapidez con que se produzca esta declinación dependerá de la fecha de inicio y culminación de la zafra ya que el cultivo adquiere su madurez promedio a los 360 días, con un rango óptimo de corte a partir de esta (15). Por lo tanto, el manejo adecuado de las cepas contribuye a la obtención de resultados de la campaña, cercanos al potencial de los cultivares y a la disminución de las pérdidas generadas por este concepto.

Se plantea que, por manejo inadecuado de las cepas, se pierden toneladas de caña y se demostró

2. Sieiro – Miranda, G. I. Influencia de variables meteorológicas en el rendimiento de la caña de azúcar. Tesis en opción al título de Licenciatura en Meteorología. Instituto de Tecnologías y Ciencias Aplicadas (INTEC), Universidad de La Habana, Cuba. 2015. 67 p.
3. González, A.N.; M. Ferrer; A. Vera.; G. Gálvez; P.P. Acosta–Pérez; G.L. Sieiro–Miranda; *et al.* Modelos para estimar el rendimiento agrícola en Cuba a partir de la composición de cepas y la lluvia de mayo a octubre. ICIDCA sobre los derivados de la caña de azúcar, 50 (1): 59–66. 2016.
4. Gutiérrez, T.; o. H. Álvarez. Utilización de un Sistema de Información Geográfica (S.I.G.) para la evaluación de la influencia del tiempo atmosférico en los rendimientos industriales de la caña de azúcar. 2015. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/275025014> [consulta 07 abril 2015].
5. Sieiro – Miranda, G. I.; P.P. Acosta; I. Soler; S. Guillen. Modelación del rendimiento agrícola de caña de azúcar en función del efecto de las precipitaciones. En: Congreso Internacional de Ciencias Agrícolas INCA 2018, Varadero, Matanzas. Memorias. 2018
6. INSMET. Base de datos meteorológicos. Instituto de Meteorología. La Habana, Cuba. 2015.
7. OMM. Guía de prácticas climatológicas. Secretaría de la Organización Meteorológica Mundial. 3ra Edición. Ginebra, Suiza. 2011. 126 p.
8. INSMET. Metadatos de las estaciones meteorológicas. Instituto de Meteorología. La Habana, Cuba. 2020.
9. Sieiro – Miranda, G. I.; M. González; M. Lozano; M. Rodríguez; B. Raya; M. González; *et al.* Influencia de las variables meteorológicas sobre el rendimiento de la caña de azúcar. *Revista Científica Biológico Agropecuaria Tuxpan* 5(7), 2016. ISSN 2007–6940.
10. Gálvez, G. (2008). “Modelación del crecimiento de las plantas”. En: Seminario internacional de modelación de cultivos. ISSN 0258–5936.
11. Pérez, H.; I. Santana; I. Rodríguez. Manejo Sostenible de Tierras en la Producción de Caña de Azúcar. Editorial UTMCH. Machala, Ecuador. 2015.
12. Raj, M.; V. Ramírez. Elementos de la Agroclimatología. Programa de Agronomía. Dpto. Ingeniería Agrícola y Biomédica, Universidad de Santa Rosa de Cabal, Puerto Rico. 2015.
13. Gálvez, G.; M. Ferrer; C. Lamela. El rendimiento en la caña de azúcar. Algunas relaciones con la biología y el manejo agronómico del cultivo. *Revista Cuba & Caña*, 2012. ISSN 1028–6527.
14. Sieiro – Miranda, G. L.; R. Vázquez; C. A. González; O. Solano; M. Herrera. Optimización de la gestión de los sistemas de producción de algunos cultivos de interés económico. En: VII Congreso Cubano de Meteorología [CD–ROM], 2014, ISBN 978–959–7167–43–3.
15. Santana, I.; M. González; S. Guillén; R. Crespo. Instructivo Técnico para el Manejo de la Caña de Azúcar. Grupo Azucarera AZCUBA. Instituto de Investigaciones de la Caña de azúcar. 2da Edición, 2013. ISBN 978–959–300–036–9.
16. Lora, N.; Y. Puchades; R. Rodríguez; M. Castilla; P. Pablos; O. Rodríguez; J. C. La. Pérdidas de rendimiento industrial por inadecuado manejo de los cultivares comerciales de caña de azúcar. *Revista Cuba & Caña*. Edición especial Evento por el 35 Aniversario de la ETICA Oriente Sur. 2019.
17. Mesa, J.M.; R. González; I. Machado; H. García; I. Jorge; D. Torres D. (2017). “Influencia de variables de manejo y clima en el rendimiento industrial de la caña de azúcar en la zafra 2015–2016 en Cuba”. En: Congreso DIVERSIFICACIÓN [CD–ROM], 2017, ISBN 978–959–16–3592–1.