

Evaluación de propiedades físico-mecánicas de tallos de caña de azúcar

Evaluation of sugarcane stems physical-mechanical properties

Autores: Rigoberto Antonio Pérez Reyes

<https://orcid.org/0000-0002-9265-5535>

Lázaro Antonio Daquinta Gradaille

<https://orcid.org/0000-0001-7723-5324>

Julio Águila Gómez

<https://orcid.org/0000-0003-3577-1668>

Institución: Universidad de Ciego de Ávila Máximo Gómez Báez, Cuba

Correo electrónico: rigobertopr@unica.cu

adaquinta@unica.cu

julio@unica.cu

RESUMEN

En el presente trabajo se evalúan propiedades físico-mecánicas de tallos de caña de azúcar, mediante la realización de un grupo de ensayos experimentales para la determinación de los principales parámetros que caracterizan a los mismos. Se realizó la determinación del coeficiente de fricción estática sobre el acero, así como la energía requerida para el corte y el módulo de elasticidad de cinco variedades de caña de azúcar representativas de la Empresa Azucarera Ecuador. Los principales resultados muestran mayores valores del coeficiente de fricción estática para las variedades C86-156 y C93-540, destacándose que son mayores estas magnitudes en las secciones sin nudos (LSN) para todas las variedades evaluadas; las variedades C86-156 y C90-469 presentan mayor energía al corte y la variedad C90-469 poseen un mayor módulo de elasticidad en la sección del entrenudo.

Palabras clave: Caña de azúcar, Ensayos experimentales, Propiedades físico-mecánicas.

ABSTRACT

In the present work, physical-mechanical properties of sugarcane stems are evaluated, by carrying out a group of experimental tests to determine the main parameters that characterize them. The static friction on steel coefficient was determined, as well as the energy required for cutting and the elasticity modulus of sugarcane five varieties representative of Ecuador Sugar Company. The main results show higher values of the

friction static coefficient for the varieties C86-156 and C93-540, highlighting that these magnitudes are higher in the sections without knots (LSN) for all the varieties evaluated; the varieties C86-156 and C90-469 have higher cutting energy and the variety C90-469 have a higher elasticity modulus in the internode section.

Keywords: Experimental tests, Physical-mechanical properties, Sugar cane.

INTRODUCCIÓN

Según el anuario estadístico de la Organización de Naciones Unidas para la agricultura y la alimentación (FAOSTAT, 2017) Latinoamérica y el Caribe constituye la principal región productora de caña de azúcar del mundo, con un promedio de 52 % de la producción (2007-2016), a su vez esta región es la principal exportadora de azúcar con un promedio de 68 % del total (2004-2013). Brasil es el mayor productor de caña de azúcar del mundo (con el 23 % de la producción mundial), siendo también el mayor exportador de azúcar con más del 50 % de las exportaciones mundiales (Marín, 2018). En Cuba, el anuario estadístico de la Oficina Nacional de Estadística e Información (ONEI, 2020) recoge que la caña de azúcar constituye el cultivo que mayor superficie agrícola ocupa, con un fondo de tierra de 314 400 ha. En los últimos años se ha producido un decrecimiento de los rendimientos agrícolas nacionales: en el año 2007 fue de 36,1 t/ha, en el 2008 de 41,3 t/ha, en el 2009 de 34,3 t/ha, en el 2011 de 26,7 t/ha y en el 2012 de 31,2 t/ha (González, 2015). La caña de azúcar constituye la base de la agroindustria azucarera cubana, como materia prima para la obtención del azúcar como producto básico, que aún ocupa un lugar destacado en la economía nacional (Rodríguez, 2019).

González (2006) caracteriza la microestructura de los tallos de tres variedades de caña de azúcar y establece relaciones entre algunas propiedades mecánicas con las dimensiones medias de las fibras. Valdés et al. (2008) determina un conjunto de propiedades físico-mecánicas de dos variedades de caña de azúcar empleadas en Cuba como forraje para la alimentación animal. Taghijarah *et al* (2012) establecen magnitudes como la resistencia al corte, la energía específica de corte, la resistencia a la flexión y el módulo de Young en dos variedades seleccionadas con contenidos de humedad promedio de 76,4 y 73,8 % en base húmeda, respectivamente. Díaz e Iglesias (2014) reportan resultados de la determinación de las propiedades físico-

mecánicas de los tallos de la caña de azúcar involucradas en el proceso de extracción de jugo para la fabricación de panela.

Sureshkumar y Jesudas (2015) determinaron magnitudes como el módulo de elasticidad, la energía específica de corte y el momento necesario para la elevación de los tallos hasta la vertical en condiciones de campo. Oriola *et al* (2017) determinan algunas propiedades mecánicas de la caña de azúcar a diferentes tamaños y cargas relevantes para el diseño y construcción de un extractor de jugo. Dongdong y Jun (2016) presentan una descripción general de la investigación realizada hasta entonces sobre las propiedades mecánicas de los tallos de los diferentes cultivos. Esta investigación se basa principalmente en la teoría mecánica del material de ingeniería e ignora el hecho de que los tallos de los diferentes cultivos son un material biológico con estructura compleja, anisotropía, viscoelasticidad y reología. Veliz *et al.* (2021) desarrollaron una revisión de las propiedades físico-mecánicas, relacionadas con el proceso tecnológico de corte de tallos u otros productos agrícolas, fundamentada en que estas propiedades dependen del tipo de material, su etapa de crecimiento, el contenido de humedad y el lugar de corte en la planta.

El objetivo del presente trabajo es evaluar algunas propiedades físico-mecánicas de los tallos de cinco variedades de caña de azúcar, mediante la realización de un grupo de ensayos experimentales, que permitan caracterizar los mismos y sirvan de datos de referencia durante el proceso de corte mecanizado.

MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se llevó a cabo en áreas de la Empresa Azucarera Ecuador del municipio Baraguá, provincia de Ciego de Ávila, una de las mayores productoras de azúcar en el territorio, donde fueron seleccionadas las cinco variedades de caña que más se cosechan en esta región. Las características identificativas de las variedades de caña estudiadas aparecen en la tabla 1.

Tabla 1. Principales características de las variedades de caña estudiadas

Variedad	Diámetro promedio (mm)	Altura promedio (m)	Densidad de población (Tallos/metro)	Cantidad de fibras (%)
C1051-73	27,00	2,90	12 – 14	13 – 14
C90-469	26,0 0	3,25	14	13,50
C120-78	31,00	3,00	12	13,65
C86-156	26,80	2,68	13	13,50

C93-540	29,80	3,10	10 – 12	13 – 14
---------	-------	------	---------	---------

Nota: Tomado de “*Varietades de caña de azúcar, patrimonio del Instituto de Investigaciones de la Caña de Azúcar al servicio de la agroindustria azucarera cubana*” (Jorge y Santa, 2013).

Las propiedades físico mecánicas determinadas fueron: el coeficiente de fricción estática sobre el acero en las secciones longitudinal y transversal de tallo (μ); la energía total de corte (E_C); la energía específica al corte (E_{EC}); el módulo de elasticidad (E) y el coeficiente de Poisson (ν).

Metodología para la determinación del coeficiente de fricción estática sobre el acero. Se aplicaron principios de la mecánica clásica (Beer et al., 2010; Hibbeler, 2006). Se sitúa la muestra sobre un plano inclinado como se observa en la figura 1a, donde se mide el ángulo para el que la muestra comienza a deslizarse. El coeficiente de fricción estática será igual a la tangente del ángulo de inclinación del plano, expresión obtenida del análisis del equilibrio estático del sistema en el diagrama de cuerpo libre. Las magnitudes del coeficiente de fricción estática fueron determinadas en las secciones longitudinal (longitudinal con nudo LCN y longitudinal sin nudo LSN) y transversal (ST) de los tallos en las cinco variedades de caña de azúcar evaluadas.

Metodología para la realización del ensayo de energía requerida para el corte. La energía requerida para cortar los tallos se evalúa usando un péndulo Charpy modificado (ver figura 1), modelo JB 300B (RM2KD1) con martillo de 25 kg y una longitud del péndulo de 635 mm. La herramienta de impacto convencional se sustituye por una sección del segmento de corte y en cada tallo se experimenta en el nudo (N) y en el entrenudo (EN). La velocidad media de la herramienta de corte fue de 4,2 m/s. En cada variedad se llevan a cabo como mínimo diez experimentos, cinco en la zona del nudo y cinco en la zona del entrenudo.

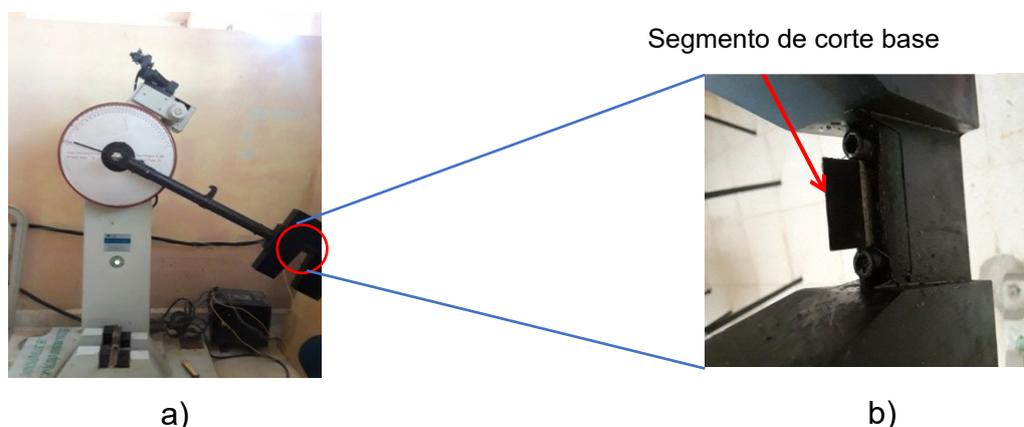


Figura 1. Péndulo Charpy modificado, utilizado en el ensayo de energía requerida para el corte:

a) Máquina en posición de trabajo; b) Herramienta de impacto modificada.

El péndulo cae sobre la probeta y corta la caña. La diferencia entre la altura inicial del péndulo y la final tras el corte permite medir la energía absorbida en el proceso. Esta usualmente se calcula como la diferencia de alturas inicial y final del péndulo, lo que supone, despreciar algunas pérdidas por rozamiento. De igual modo, el péndulo Charpy utilizado ofrece la posibilidad de realizar la lectura de la energía absorbida, mediante una carátula graduada en función del tipo de martillo empleado en el ensayo. La energía específica al corte se calcula como la energía total al corte, dividida por el área de la sección transversal del tallo.

Es importante señalar que pese a las limitaciones del péndulo que no alcanza las velocidades de corte del proceso de corte mecanizado, las magnitudes obtenidas pueden ser comprobadas con las reportadas por otros autores como González, et al. (2008); Sureshkumar y Jesudas (2015), quienes han utilizado este método para la determinación de la energía al corte en caña de azúcar.

Metodología para la obtención del módulo de elasticidad y el coeficiente de Poisson.

Estas magnitudes se alcanzan a través de un ensayo de compresión. Comúnmente se emplea una relación entre longitud y diámetro de 2 o más, aunque la relación entre altura y diámetro varía para materiales diferentes. El tamaño real depende del tipo de material, del tipo de mediciones a realizar y del aparato de ensayo disponible (Salas y De la Hoz, 2018). En esta investigación el ensayo se realizó utilizando un durómetro universal HRS-150 modificado y adaptado para aprovechar la compresión del husillo en la realización del experimento. Los datos obtenidos de este ensayo incluyen el límite elástico, el módulo de Young, el coeficiente de Poisson, la curva de esfuerzo deformación, y la resistencia a compresión.

Para garantizar la precisión y confiabilidad necesarias de los resultados experimentales se utilizó la metodología de Shirakov (1985), que permite asegurar un grado de precisión del ensayo en función del error relativo, que para trabajos científicos de investigación no debe exceder de 3 a 5 %. A partir del valor de error relativo definido (e_r) se determinó el tamaño de la muestra (número de réplicas n), necesario para garantizar la requerida precisión en los ensayos, mediante la ecuación (1) que involucra al coeficiente de variación (V).

$$n = \frac{2 \cdot 100^2}{e_r V^2} \quad (1)$$

Desde el punto de vista práctico para una probabilidad del 95 % se tienen los resultados del grado de precisión del ensayo en función del error relativo en la tabla 2

Tabla 2. Grado de precisión del ensayo

Magnitud del error relativo (e_r)	Grado de precisión del ensayo
$e_r \leq 2$	Alto
$2 < e_r \leq 5$	Medio
$5 < e_r \leq 10$	Bajo
$e_r \geq 10$	Muy Bajo

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Fricción estática sobre el acero. La figura 2 representa los resultados comparativos de los valores medios del ángulo de fricción estática para cada sección de las variedades evaluadas. Aquí los mayores valores de ángulo de fricción estática se obtienen para las variedades C86-156 y C93-540; se destaca que existen mayores magnitudes del ángulo de fricción en las secciones sin nudos (LSN) para todas las variedades estudiadas. La determinación de los valores de los ángulos y los coeficientes de fricción estáticos tiene como objetivo caracterizar, desde el punto de vista físico, los tallos de las diferentes variedades de caña estudiadas, así como contar con las magnitudes necesarias a utilizar en posibles modelos numéricos del corte de la caña de azúcar.

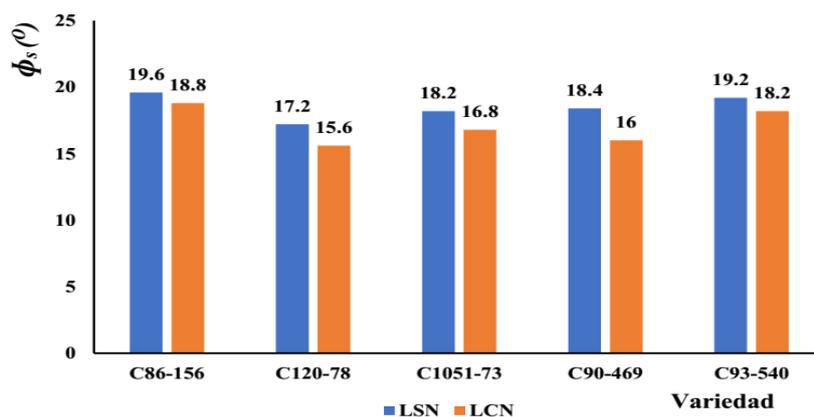


Figura 2. Valores medios del ángulo de fricción estática sobre el acero de los segmentos de corte base.

La figura 3 representa los resultados comparativos de los valores del coeficiente de fricción estática en la sección transversal del tallo para cada variedad. Aquí el mayor

valor se obtiene para la variedad C86-156 y la magnitud promedio del coeficiente de fricción estática sobre el acero en la sección transversal del tallo para las variedades estudiadas alcanza el valor de $\mu_s = 0,588$, el cual está en correspondencia con los obtenidos por González et al. (2008) y Rezende (2020).

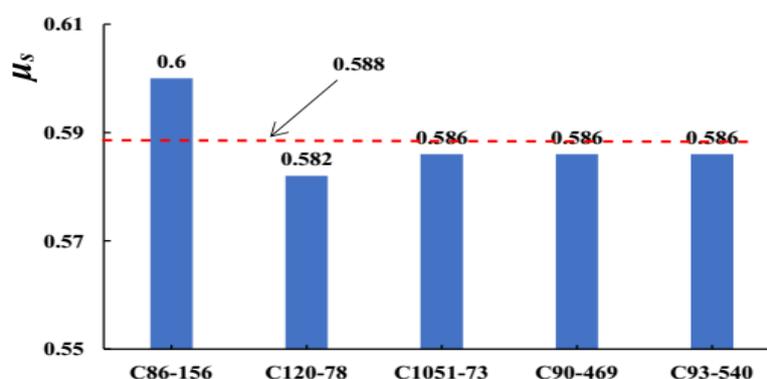


Figura 3. Valores del coeficiente de fricción estática sobre el acero en la sección transversal del tallo para cada variedad.

Los resultados del procesamiento estadístico de los datos obtenidos durante la determinación del coeficiente de fricción estática sobre el acero en la sección transversal de los tallos (ver tabla 3) revelan que el valor del coeficiente de variación en cada una de las variedades es inferior a 5 %, lo que garantiza un 95 % de nivel de confianza para el tamaño de muestra seleccionado. Además, las magnitudes de ambos parámetros se ajustan a una distribución normal, pues el sesgo estandarizado y la curtosis estandarizada en todas las variedades se encuentran dentro del rango esperado de -2 a +2.

Tabla 3. Resumen Estadístico del coeficiente de fricción estático en la sección transversal del tallo

	C86-156	C120-78	C1051-73	C90-469	C93-540
Recuento	5	5	5	5	5
Promedio	0.6	0.582	0.586	0.586	0.586
Desviación Estándar	0.02	0.0204939	0.0260768	0.0260768	0.0260768
Coeficiente de Variación	3.33333%	3.52129%	4.44997%	4.44997%	4.44997%
Sesgo Estandarizado	0.0	-0.933293	-0.10811	-0.10811	-0.10811
Curtosis Estandarizada	-1.36931	0.419175	0.120426	0.120426	0.120426

Resultados del ensayo de energía requerida para el corte. Los resultados del ensayo de energía requerida para el corte se muestran en la tabla 4, donde se observa que las variedades C86-156 y C90-469 son las que presentan mayores valores de energía

específica al corte, mientras que la variedad C93-540 muestra el menor valor en esta magnitud. Este comportamiento pudiera estar bajo la influencia de las magnitudes de los diámetros y los ángulos de fricción estática (μ_s). De igual modo se observa que los valores de la energía específica al corte para la sección del entrenudo, son ligeramente superiores a los de las secciones con nudo en todas las variedades estudiadas, lo que se corresponde con los resultados de González et al. (2008), ya que las secciones con nudos, aunque pueden tener mayor diámetro, suelen ser menos homogéneas que las secciones del entrenudo.

Tabla 4. Energía total y específica al corte en las cinco variedades de caña analizadas para los segmentos de corte BONEM

Variedad	Diámetro medio (mm)	Energía total al corte (J)	Energía específica al corte (mJ/mm²)	Ángulo del filo (°)
Entrenudos				
C86-156	26,13	27,2	50,72	25
C120-78	29,31	28,5	42,24	
C1051-73	27,62	25,8	43,06	
C90-469	25,43	29,6	58,28	
C93-540	32,14	28,4	35,00	
Nudos				
C86-156	28,29	27,4	43,59	25
C120-78	30,57	29,7	40,46	
C1051-73	29,02	29,8	45,05	
C90-469	27,66	28,8	47,93	
C93-540	33,28	29,5	33,91	

Los resultados obtenidos pueden ser comparados con trabajos previos realizados en Cuba por Valdés et al. (2008; 2009), donde se obtienen las curvas que representan la variación de la energía específica al corte durante el corte de tallos de caña de azúcar en función de la velocidad lineal de corte para tres ángulos de deslizamiento. Lo anterior se ajusta matemáticamente a un modelo exponencial, donde se observa que la energía específica consumida durante el corte de los tallos disminuye en la medida que aumenta la velocidad de corte, presentándose una tendencia asintótica a partir de magnitudes de entre 20 y 30 m/s para todos los casos experimentados (ver figura 4).

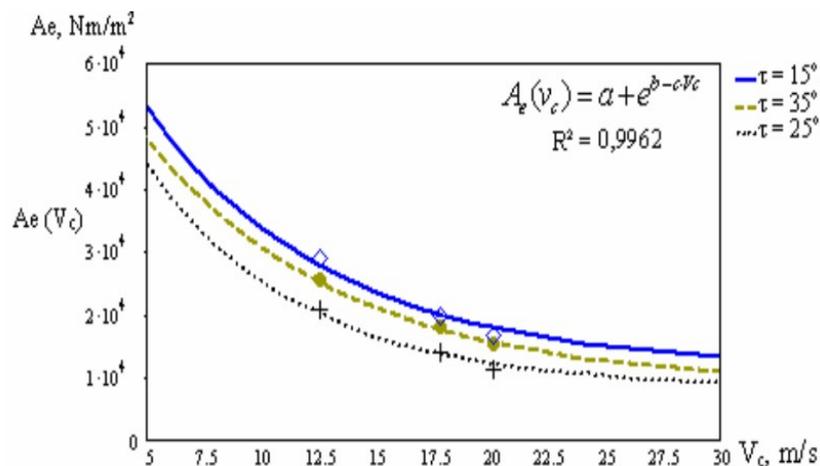


Figura 4 Variación de la energía específica durante el corte de los tallos A_e en función de la velocidad de corte V_c (Valdés et al.; 2008; 2009).

Los valores obtenidos en el ensayo del péndulo Charpy con velocidad de corte igual a 4,2 m/s están dentro del intervalo de valores en la zona de bajas velocidades del gráfico para cuatro de las cinco variedades de caña estudiadas, siendo solo inferiores para la variedad C93-540.

De igual modo, las magnitudes obtenidas de Energía total al corte (J) y Energía específica al corte (mJ/mm^2) están en correspondencia con los valores obtenidos por Dongdon y Jun (2016); Gedam *et al.* (2015); Oriola *et al.* (2017) y Taghijarah *et al.* (2011; 2012) y difieren de los alcanzados por Hemmatian *et al.* (2012) y Mathanker *et al.* (2015) en el estudio de otras variedades, lo que corrobora la gran variabilidad en las magnitudes de los parámetros físico-mecánicos de las diferentes variedades de caña de azúcar.

Resultados del ensayo de compresión axial. Para la realización de los ensayos fue necesario calibrar el equipo a través de un sensor de fuerzas de 50 N acoplado a una computadora mediante una interface, con el objetivo de conocer las magnitudes de fuerzas aplicadas en función del desplazamiento del husillo. En la tabla 5 aparecen los valores de las magnitudes medias medidas en el ensayo de compresión axial para cada una de las variedades en las secciones con nudo (LCN) y sin nudo (LSN). Los valores obtenidos del Módulo de Elasticidad para las variedades de caña estudiadas oscilan en el intervalo de 12,71 a 24,42 MPa, los que son similares a los alcanzados por Dongdon y Jun (2016); Oriola *et al.* (2017) y Taghijarah *et al.* (2011; 2012) en la comparación de propiedades mecánicas de variedades de tallos de caña de azúcar.

Tabla 5. Magnitudes medias medidas en el ensayo de compresión axial

Variedades	ΔL (mm)	D_0 (mm)	F (N)	LSN			E (MPa)	ΔD (mm)	ξ_T (%)	ν
				L_0 (mm)	σ (MPa)	ξ_L (%)				
C86-156	11,87	23,85	1 645,74	63,43	3,68	18,71	19,67	1,61	6,74	0,36
C120-78	11,93	30,97	1 659,71	71,24	2,20	16,75	13,13	1,61	5,19	0,31
C1051-73	12,12	27,29	1 704,31	69,00	2,91	17,56	16,57	1,53	5,62	0,32
C90-469	11,83	20,49	1 636,46	58,24	4,96	20,31	24,42	1,66	8,12	0,40
C93-540	12,03	28,03	1 683,11	56,21	2,72	21,40	12,71	1,80	6,42	0,30
				LCN						
C86-156	11,98	23,55	1 671,39	62,17	3,83	19,27	19,88	1,63	6,94	0,36
C120-78	11,87	27,36	1 645,74	67,25	2,80	17,65	15,86	1,55	5,65	0,32
C1051-73	11,96	23,15	1 666,71	58,21	3,96	20,55	19,27	1,81	7,81	0,38
C90-469	12,22	28,56	1 728,02	71,26	2,70	17,14	15,75	1,47	5,14	0,30
C93-540	12,05	26,93	1 687,81	66,38	2,96	18,15	16,31	1,61	5,99	0,33

Nota: En esta tabla los valores de la fuerza F están calculados por la ecuación de la curva polinomial de orden dos obtenida en el gráfico de fuerza desplazamiento durante la calibración del equipo, que toma la expresión:
 $F = 7,8847 \cdot \Delta L^2 + 45,144 \cdot \Delta L - 1,0496$

La experimentación y el análisis estadístico desarrollados permitieron la determinación de propiedades físicas y mecánicas de los tallos de cinco variedades de caña de azúcar y la revelación de las tendencias y regularidades de los procesos analizados. Estos resultados permiten reconocer las particularidades de cada variedad y analizar cómo influyen en el desempeño de los segmentos de corte base durante la cosecha.

CONCLUSIONES

- La magnitud promedio del coeficiente de fricción estática en las secciones longitudinales de los tallos de las cinco variedades de caña de azúcar estudiadas es de $\mu_s = 0,302$, mientras que en la sección transversal alcanza el valor de $\mu_s = 0,588$.
- Las mayores magnitudes de energía específica al corte en la sección del entrenudo se obtienen para las variedades C86-156 y C90-469 con valores de 50,72 y 58,28 mJ/mm² respectivamente, mientras que en la sección del nudo son las variedades C120-71 y C90-469 las de mayores valores con magnitudes de 45,05 y 47,93 mJ/mm².
- La mayor magnitud del módulo de elasticidad en la sección del entrenudo se obtuvo para la variedad C90-469 con un valor de 24,42 MPa y en la sección del nudo para la variedad C86-156 con un valor de 19,88 MPa.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BEER, F. P., JOHNSTON E. R. y EISENBERG, E. R. (2010). Mecánica vectorial para ingenieros. México: Ed. Mc Graw Hill.
- DÍAZ, A. e IGLESIAS, C. C. E. (2014). Determinación de las propiedades físico-mecánicas de la caña de azúcar como objeto de la extracción de su jugo para la producción de panela. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, La Habana, Vol. 23, No 2, p. 18-22.
- DONGDONG, D. y JUN, W. (2016). Research on mechanics properties of crop stalks: A review, *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, Vol. 9, No 6, p. 10-19. Disponible en: <http://doi.10.3965/j.ijabe.20160906.1499>. Visitado: 12 de octubre de 2021.
- GEDAM, K., DESHMUKH, M. y THAKARE, S. K. (2015). Mechanical Properties of Sugarcane Stalk. *Madras Agricultural Journal*, Vol. 102, No 7-9, p. 81-284.
- GONZÁLEZ, C. M. (Ed.). (2015). La agroindustria cañera cubana: transformaciones recientes [en línea]. Published by Bildner Center for Western Hemisphere Studies. The Graduate Center, The City University of New York. Disponible en: <https://cubaproject.org/wp-content/uploads/2014/07/SugarEbook.pdf>. Visitado el 12 de octubre de 2021.
- GONZÁLEZ, H. (2006). Análisis del corte de caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.) con cuchillas metálicas. Medellín, Colombia [en línea]. Tesis de Magíster en Ingeniería de Materiales y Procesos, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas, Disponible en: <https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/3376> Visitado el 11 de julio de 2018.
- GONZÁLEZ, S. H. A. ... [et al.] (2008). Correlación entre propiedades anatómicas, resistencia a flexión estática y energía requerida para el corte de la caña de azúcar. *Revista de la Facultad Nacional de Agronomía de Medellín*, Vol. 61, No 2, p. 4709-4720.
- HEMMATIAN, R. ... [et al.] (2012). Experimental and Theoretical Investigation of the Effects of Moisture Content and Internodes Position on Shearing Characteristics of Sugar Cane Stems. *Journal of Agricultural Science and Technology*, Vol. 14, pp. 963-974.

- HIBBELER, R. C. (2006). *Mecánica de materiales*. Sexta edición. México: Pearson Educación S.A.
- JORGE, G. I. M. y SANTA, A. I. (2013). *Variedades de caña de azúcar, patrimonio del Instituto de Investigaciones de la Caña de Azúcar al servicio de la agroindustria azucarera cubana*. La Habana: Ed. PUBLINICA.
- MARÍN, F. R. ... [et al.] (2018). *Modelación de la caña de azúcar en Latinoamérica. Estado del arte y base de datos para parametrización*, EUR 29018 ES, Oficina de Publicaciones de la Unión Europea, Luxemburgo. Disponible en: http://doi.10.2760/247719_JRC1103225. Visitado: 25 de enero de 2023.
- MATHANKER, S. K., GRIFT, T. E. y HANSEN, A. C. (2015). Effect of blade oblique angle and cutting speed on cutting energy for energy cane stem. *Biosystems Engineering*, Vol. 133, pp. 64-70.
- OFICINA NACIONAL DE ESTADÍSTICA E INFORMACIÓN (ONEI, 2020) (15 de mayo). *Anuario estadístico de cuba, 2019. Agricultura, ganadería y silvicultura*. [en línea]. Edición 2020. Disponible en: http://www.onei.gob.cu/sites/default/files/09_agricultura_ganaderia_y_pesca_2019.pdf. Visitado el 24 de mayo de 2021.
- ORGANIZACIÓN DE NACIONES UNIDAS PARA LA AGRICULTURA Y LA ALIMENTACIÓN (FAOSTAT, 2017) (11 de julio). *Sugarcane yield and production in LA*. [en línea]. Disponible en: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC> Visitado el 14 de noviembre de 2020.
- ORIOLA, K. O. ... [et al.] (2017). Some Mechanical properties of sugarcane at different sizes and loadings relevant to design and construction of sugarcane juice extractor. *Int. Journal of Engineering Research and Application*, Vol. 7, No 7, pp. 62-70. Disponible en: <http://doi.10.9790/9622-0707086270>. Visitado: 15 de febrero de 2023.
- REZENDE, S. A. A. (2020). *Simulação numérica aplicada ao corte basal dos colmos de cana-de-açúcar. Brazil, 88 h*. [en línea]. Dissertação apresentada no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas e Automação para a obtenção do título de Mestre, Universidade Federal de Lavras-MG, UFLA. Disponible en: <http://repositorio.ufla.br/bitstream/dissertação.pdf>. Visitado el 8 de septiembre de 2021.

- RODRÍGUEZ, L. Y. (2019). Organización racional del complejo cosecha-transporte en caña de azúcar con la integración de modelos matemáticos. Mayabeque, Cuba, 112 h [en línea]. Tesis en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas Agropecuarias Universidad Agraria de la Habana Fructuoso Rodríguez Pérez, Facultad de Ciencias Técnicas. Disponible en: <https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/3376>. Visitado el 14 de noviembre de 2020.
- SALAS, S. J. M. y DE LA HOZ, T. J. S. (2018). Ensayo de compresión. [en línea]. Disponible en: https://www.academia.edu/38974085/ensayo_de_compresi%C3%93n. Visitado: el 16 de abril de 2020.
- SHIRAKOV, V. P. (1985). Manual de Hilandería. Análisis Experimentales. (Diseños de experimentos). Moscú. pp. 392-394.
- SURESHKUMAR, P. K. y JESUDAS, D. M. (2015). Physico-mechanical properties of sugar cane stalks related to mechanical harvesting. *Journal of Tropical Agriculture*, Vol. 53, No 1, pp. 48-55.
- TAGHIJARA, H. ... [et al.] (2011). Shearing characteristics of sugar cane (*Saccharum officinarum* L.) stalks as a function of the rate of the applied force. *Australian Journal of Crop Science*, Vol. 5, No 6, pp. 630-634.
- TAGHIJARA, H. ... [et al.] (2012). Comparison of mechanical properties between two varieties of sugar cane stalks. *Elixir Mech. Engg.*, Vol. 42, p. 6415-6419, ISSN: 2229-712X.
- VALDÉS, H. P. A., GONZÁLES, D. y MARTÍNEZ, A. (2008). Determinación experimental de propiedades físico- mecánicas de la caña de azúcar para su procesamiento en molinos forrajeros. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, Vol. 17, No 2, p. 1-6.
- VALDÉS, H. P. A. ... [et al.] (2009). Influencia del ángulo de deslizamiento y la velocidad de la cuchilla sobre la energía específica durante el corte de tallos de caña de azúcar. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, Vol. 18, No 1, p. 21-26.
- VELIZ, R. D, VALDÉS, H. P. A. y HERNÁNDEZ, A. P. M. (2021). Propiedades físico-mecánicas del corte de tallos u otros productos agrícolas. *Revista Ingeniería Agrícola*, Vol. 11, No 1, p 58-66.

Conflicto de interés

Los autores no declaran conflictos de intereses.



Esta obra está bajo una licencia internacional [Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/). Se permite su copia y distribución por cualquier medio siempre que mantenga el reconocimiento de sus autores, no haga uso comercial de los contenidos y no realice modificación de la misma.