

# Control de la succión en molinos forrajeros sin alimentación forzada durante el procesamiento de moringa

## *Control of suction in forage mills without forced feeding during moringa processing*

✉ María del Carmen Sigler Muñoz<sup>1</sup>, ✉ Omar Peña Sosa<sup>2</sup>, ✉ Arturo Martínez Rodríguez<sup>1\*</sup>, ✉ Pedro Valdés Hernández<sup>1</sup>,  
✉ Raudel Flores Moreno<sup>2</sup>, ✉ Alejandro Revilla Chaviano<sup>2</sup> and ✉ José Alejandro Che Quiñones<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad Agraria de La Habana (UNAH), Facultad de Ciencias Técnicas, San José de las Lajas, Mayabeque, Cuba. E-mail: [msigler@unah.edu.cu](mailto:msigler@unah.edu.cu), [pvaldes@unah.edu.cu](mailto:pvaldes@unah.edu.cu)

<sup>2</sup>Universidad Politécnica de Texcoco, Texcoco de Mora, Edo. México, México. E-mail: [raudelfm2014@gmail.com](mailto:raudelfm2014@gmail.com), [barcarevilla@gmail.com](mailto:barcarevilla@gmail.com)

\*Autor para correspondencia: Arturo Martínez Rodríguez, e-mail: [armaro646@gmail.com](mailto:armaro646@gmail.com)

**RESUMEN:** En Cuba, como alternativa al uso de concentrados importados, se promueve la producción y adición en las dietas, de plantas proteicas producidas en las propias granjas, entre las cuales sobresale la moringa (*Moringa oleifera*), siendo necesario adaptar los parámetros de los molinos desmenuzadores, de manera de procesar eficientemente este tipo de forraje. En las granjas ganaderas predomina el tipo de molino forrajero sin alimentación forzada, siendo la masa succionada mediante la propia acción de las cuchillas de corte. La capacidad de succión del molino, el calibre de las partículas desmenuzadas y la relación carga-capacidad, dependen de un conjunto de parámetros de diseño y operación de la máquina, así como de determinadas propiedades físico-mecánicas del material procesado. En el trabajo se obtienen, mediante la modelación mecánico-matemática conceptual de la interacción de un órgano de corte de un molino forrajero del tipo de tambor, sin alimentación forzada, las expresiones que permiten calcular los parámetros de diseño y operación del molino que garanticen un efecto de succión eficiente, con un flujo de material y calibre de las partículas requeridos, durante el procesamiento de una masa vegetal compuesta por tallos de pequeño grosor, ramificaciones y hojas. Asimismo, se determina experimentalmente un conjunto de propiedades de la moringa, requeridos como datos de entrada a los modelos, los cuales son evaluados con el auxilio de softwares elaborados a los efectos, determinando, para esta planta forrajera, los parámetros de operación del molino que garanticen un trabajo eficiente del mismo y el calibre requerido del forraje procesado.

**Palabras clave:** Moringa oleifera, calibre de partículas desmenuzadas, acción de cuchillas de corte, modelación conceptual.

**ABSTRACT:** In Cuba, as an alternative to imported concentrates, the production and inclusion of protein-rich plants grown on farms is being promoted in animal diets. Moringa (*Moringa oleifera*) is a prominent example, requiring adjustments to the parameters of forage mills to efficiently process this type of forage. On livestock farms, the predominant type of forage mill is one that does not use forced feeding, with the forage being drawn in by the cutting blades themselves. The mill's suction capacity, the size of the ground particles, and the load-capacity ratio depend on a set of machine design and operating parameters, as well as certain physical and mechanical properties of the processed material. This work derives, through conceptual mechanical-mathematical modeling of the interaction of a cutting element in a drum-type forage mill without forced feeding, the expressions that allow the calculation of the mill's design and operating parameters. These parameters ensure an efficient suction effect, with the required material flow and particle size, during the processing of a plant mass composed of thin stems, branches, and leaves. Additionally, a set of moringa properties, required as input data for the models, is experimentally determined. These properties are evaluated using specially developed software, thus determining, for this forage plant, the mill's operating parameters that guarantee efficient operation and the required particle size of the processed forage.

**Keywords:** Moringa oleifera, Particle Size, Cutting Blade Action, Conceptual Modeling.

Recibido: 12/07/2025

Aceptado: 07/11/2025

**Conflicto de intereses:** Los autores de este trabajo declaran no presentar conflicto de intereses.

**Author contributions:** Conceptualization: M. C. Sigler, A. Martínez. **Data curation:** M. C. Sigler, A. Martínez. **Formal analysis:** M. C. Sigler, A. Martínez. **Investigation:** M.C. Sigler, A. Martínez, O. Peña, P. Valdés, R. Flores, A. Revilla, J. Che Quiñones. **Methodology:** A. Martínez, M. C. Sigler. **Software:** A. Martínez, P. Valdés. **Supervision:** M.C. Sigler, A. Martínez. **Roles/Writing, original draft:** M.C. Sigler, A. Martínez, P. Valdés. **Writing, review & editing:** M.C. Sigler, A. Martínez, R. Flores.

La mención de marcas comerciales de equipos, instrumentos o materiales específicos obedece a propósitos de identificación, no existiendo ningún compromiso promocional con relación a los mismos, ni por los autores ni por el editor.



Este artículo se encuentra bajo los términos de la licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial (CC BY-NC 4.0).  
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>



## INTRODUCCIÓN

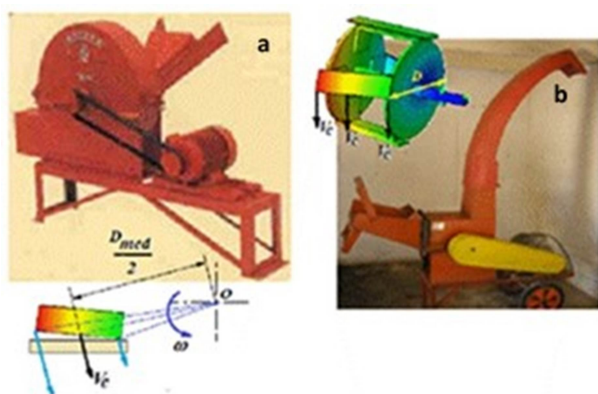
Debido al elevado contenido de proteína, vitaminas y minerales que se encuentran en hojas de moringa (*Moringa oleifera*), diversos investigadores Garavito (2008); Olson y Fahey (2011); Alvarado *et al.* (2018); Kekana *et al.* (2019); Bashar *et al.* (2020); Su y Chen (2020); Rizwan *et al.* (2024) han argumentado las bondades de esta especie como una alternativa para incrementar la calidad nutritiva de los forrajes utilizados en la alimentación ganadera.

Por otra parte, Padilla *et al.* (2012), explican que crece adecuadamente en condiciones áridas y semiáridas, tolerando las condiciones de sequía, principalmente en regiones tropicales donde la época de sequía es prolongada y reduce la disponibilidad y calidad de forraje para el ganado. Asimismo, la moringa es considerada como una planta multipropósito, que favorece al reciclaje de nutrientes, conservación del agua y fertilidad en el suelo (Alvarado *et al.*, 2018).

En Cuba las tecnologías empleadas en los programas de desarrollo del ganado lechero, hasta finales de la década de los 80as del siglo pasado, fueron de tipo intensivas de altos insumos, que tenían una alta dependencia de fuentes de alimentos de importación, por lo que las granjas no producían los volúmenes y calidades de nutrientes requeridos para el suplemento alimenticio de los animales.

A partir del año 1989 surgen afectaciones económicas en el país que imposibilitan mantener los niveles de insumos de importación, con los cuales se sustentaba la base alimentaria de la ganadería nacional. Debido a esto se elaboró un programa de autosuficiencia alimentaria, basado en la producción por los propios ganaderos del alimento demandado por la masa animal.

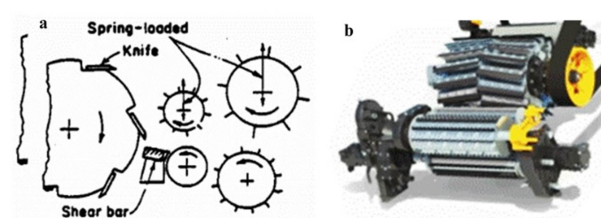
Entre las alternativas de producción de alimentos para el ganado, se contempló la producción de forrajes, basados inicialmente en Caña de Azúcar, King Grass y otras gramíneas, dotándose a las granjas de molinos desmenuzadores de forraje, inicialmente del tipo de discos (Fig. 1a), proliferando posteriormente la producción de molinos del tipo de tambor (Fig. 1b), diseñados y regulados para el desmenuzado de tallos gruesos o semigruesos.



**Figura 1.** Molinos forrajeros típicos empleados en Cuba: a) Molino del tipo de disco; b) Molino de tambor.

En los últimos años, con vistas al enriquecimiento de nutrientes en la alimentación animal, como alternativa a la utilización de concentrados de importación, se promueve la producción y adición en las dietas, de plantas proteicas, entre las cuales sobresale la moringa (*Moringa oleifera*), siendo necesario adaptar los parámetros constructivos y de explotación de los molinos, de manera de procesar eficientemente este tipo de forraje, compuesto fundamentalmente por hojas y tallos de menor grosor, que al ser procesados en estos tipos de molinos, no se garantiza la magnitud y uniformidad requeridos para el tamaño de las partículas.

Comercialmente se ofertan picadoras de forraje estacionarias que poseen alimentación mecánica mediante rodillos alimentadores (Fig. 2) que garantizan diferentes opciones para el tamaño de las partículas cortadas, asegurando una uniformidad satisfactoria de este indicador, independientemente del tipo de forraje procesado.



**Figura 2.** Sistema de rodillos para alimentación forzada en picadoras de forraje. Fuente: Barrientos-Rivera *et al.*, 2023

En ambos tipos de molinos disponibles en las granjas ganaderas en Cuba (Fig. 1), la alimentación del forraje a procesar no se produce mediante alimentación forzada por rodillos alimentadores, sino que el forraje es situado por el operador directamente en las rampas de alimentación, siendo necesario que la acción de las cuchillas sobre la masa vegetal provoque un efecto de succión, del cual dependerá el tamaño de las partículas desmenuzadas y la productividad del proceso, entre otros parámetros de importancia que garantizan un funcionamiento eficiente del molino.

Tanto la capacidad de succión del molino, como la relación carga-capacidad y la potencia consumida en el proceso tecnológico de corte e impulsión del material procesado, dependen de un conjunto de parámetros de diseño y operación de la máquina, así como de determinadas propiedades físico-mecánicas del material procesado.

Aspectos teóricos y experimentales dirigidos a la determinación de los parámetros de los molinos forrajeros y otros tipos de cortadoras de forraje han sido abordados, tanto en la literatura clásica Sáblikov (1963); Rieznik (1964); Basoi *et al.* (1976), como en investigaciones posteriores Alfiorov *et al.* (1981); Fernández y Martínez (1988); Koegel *et al.* (1990); Shinnars *et al.* (1991); Carmolinga (1995), a partir de los cuales se ha logrado más recientemente Martínez y Valdés (2004); Valdés *et al.* (2010; 2012); Valdés y Martínez (2011), elaborar y validar modelos de cálculo de dichos parámetros para el caso de picadoras de forraje de alimentación manual,

aunque aplicables básicamente al procesamiento de tallos gruesos, no siendo apropiados durante el procesamiento de una masa vegetal mixta como la de la moringa, compuesta de hojas, ramificaciones y tallos de poco grosor, que, al interactuar con las cuchillas, a diferencia de los tallos gruesos, van incrementando notablemente su densidad hasta alcanzar un nivel de compactación tal que genere la resistencia requerida para el comienzo del corte propiamente dicho. De manera que, el problema a resolver en esta investigación radica, por un lado, en la necesidad de adecuar los modelos de cálculo de los parámetros de diseño y operación de las picadoras de forraje sin rodillos alimentadores, disponibles en Cuba, de manera que puedan utilizarse con eficiencia durante el procesamiento de moringa, logrando condiciones de succión de la masa vegetal procesada que garanticen un tamaño de partículas desmenuzadas y una productividad acordes a los requerimientos. Por otro lado, surge la necesidad de determinar experimentalmente determinadas propiedades físico-mecánicas, propias de este tipo de masa vegetal, que inciden en el proceso de succión de la masa y que se requieren como datos de entrada a dichos modelos de cálculo.

Partiendo de esta problemática, se plantean como objetivos de la presente investigación:

- Elaborar los modelos mecánico-matemáticos que posibiliten calcular, para molinos forrajeros de tambor sin rodillos alimentadores y durante el procesamiento de masa vegetal mixta, la capacidad de succión del molino, el calibre de las partículas procesadas y la relación carga-capacidad.
- Determinar las principales propiedades físico-mecánicas de la moringa que se requieren como datos de entrada a los modelos elaborados.
- Calcular, mediante la evaluación de los modelos elaborados, los principales parámetros de diseño y operación a recomendar para el control de las condiciones de succión en los molinos forrajeros de tambor sin rodillos alimentadores, durante el procesamiento de moringa.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Método aplicado para la elaboración de los modelos de cálculo

Para la elaboración de los modelos de cálculo de los parámetros de diseño y operación de los molinos forrajeros objeto de estudio, se empleó el método conceptual de modelación, en particular la modelación mecánico-matemática, basada en la aplicación de las leyes de la mecánica a los procesos de interacción entre los órganos de trabajo del molino y la masa vegetal procesada.

Este método de modelación empleado, a diferencia de la modelación empírica, presenta un carácter determinístico, o sea que, para las mismas variables de entrada se obtienen siempre las mismas variables de salida, sin presentar incertidumbre (Martínez, 2007).

Los aspectos objeto de modelación, con vistas a determinar los parámetros de diseño y operación fueron:

- El proceso de succión de la masa vegetal durante su interacción con las cuchillas de corte;
- La relación carga-capacidad de paso del molino.

Para la modelación del proceso de succión de la masa vegetal por el órgano de corte del molino, se parte de analizar las fuerzas de interacción que se originan entre las cuchillas de corte, la masa vegetal y la sufridera, aplicando sumatoria de fuerzas en el plano perpendicular al plano de corte y ajustando los parámetros de manera tal que, la resultante de la componente horizontal de la fuerza que ejercen las cuchillas sobre la masa vegetal, venza la fuerza de fricción entre la masa vegetal y la sufridera. Las expresiones que permiten determinar la velocidad que imprime el efecto de succión al material procesado, de la cual depende el calibre de las partículas y la productividad del proceso, se obtienen aplicando el principio del trabajo y la energía al proceso de interacción de las cuchillas con la masa vegetal.

La relación carga-capacidad de paso del molino constituye uno de los aspectos fundamentales durante el cálculo de cualquier órgano de trabajo que cumple determinado proceso tecnológico. Por lo general, del análisis de la relación carga-capacidad se derivan funciones que permiten relacionar los diferentes parámetros que intervienen en un proceso tecnológico dado, con vistas a establecer el régimen de trabajo adecuado de los órganos de trabajo de las máquinas que efectúan dicho proceso.

En el caso que nos ocupa, la carga se determina sobre la base del consumo diario de forraje requerido por la masa a alimentar en la granja y por el tiempo de trabajo destinado al procesamiento de la misma, mientras que la capacidad se determina en función de parámetros cinemáticos y constructivos del molino, dependiendo, además, de determinadas propiedades físico-mecánicas del material procesado y del calibre de las partículas a obtener producto de su procesamiento.

Finalmente, con vistas a garantizar un cálculo adecuado de los parámetros del molino, se establece la coincidencia entre la carga  $q$  (kg/s) y la capacidad de paso  $q_o$  (kg/s) de manera de evitar atoros y garantizar un trabajo eficiente del equipo.

Durante el proceso de modelación se partió del análisis de modelos desarrollados con anterioridad, basados en el procesamiento de tallos gruesos Martínez y Valdés (2004); Valdés et al. (2010), adaptando los mismos para el caso del procesamiento de masa vegetal mixta, como es el caso de la moringa.

### Materiales y métodos empleados para la determinación de las propiedades de la moringa

Diferentes propiedades de la materia vegetal forrajera, que se relacionan con su interacción con los órganos de trabajo de los molinos, constituyen parámetros de entrada en los modelos de cálculo objeto de estudio.



Entre estas propiedades se encuentran: el área de carga, el coeficiente o ángulo de fricción del material procesado con el metal, generalmente acero; la densidad de la masa procesada, tanto en su forma inicial, como compactada y la energía específica de corte. En este trabajo fueron objeto de determinación experimental:

- El área de carga
- La densidad de la masa procesada durante el corte por las cuchillas
- El ángulo de fricción estático de la masa vegetal con el material de la sufridera.

En cuanto al ángulo de fricción dinámico y la energía específica de corte, se determinan a través de cálculos basados en datos experimentales de otros autores.

### Área de carga

El área de carga ( $F_c$ , m<sup>2</sup>) se define como el área de la sección de la masa vegetal que enfrentan las cuchillas en cada acción de corte (Martínez, 2019). En función del tipo de masa vegetal a procesar y del tipo de molino, el área de carga se determina por tres vías diferentes:

- En el caso del corte de tallos gruesos en molinos sin rodillos alimentadores, el área de carga puede determinarse según la siguiente expresión según Martínez et al. (2004) y Valdés et al. (2012a):

$$F_{ctg} = c \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \quad (1)$$

donde:

$d$ - es el diámetro medio exterior de los tallos procesados, m  
 $c$ - es el número de tallos que son alimentados simultáneamente.

- Durante el procesamiento de masa vegetal compactada con rodillos alimentadores, se determina mediante la expresión:

$$F_{cra} = a \cdot \ell \cdot \varepsilon \quad (2)$$

donde:

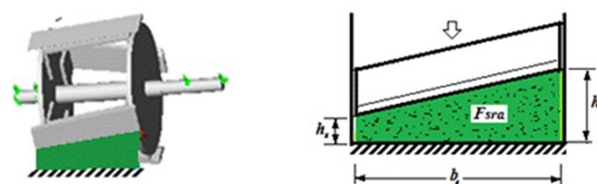
$a$ - es el juego ( $a$ ) entre los rodillos, m

$\ell$ - es la longitud efectiva o ancho de la garganta de alimentación, m

$\varepsilon$ - es un coeficiente de llenado

- Durante el procesamiento de masa vegetal, compuesta por una mezcla de ramificaciones y hojas, compactada por la propia acción de las cuchillas, en molinos sin sistema de alimentación forzada, el área de carga ( $F_{sra}$ , Fig. 3) dependerá del área que asuma la masa vegetal al momento inminente de producirse el comienzo del corte.

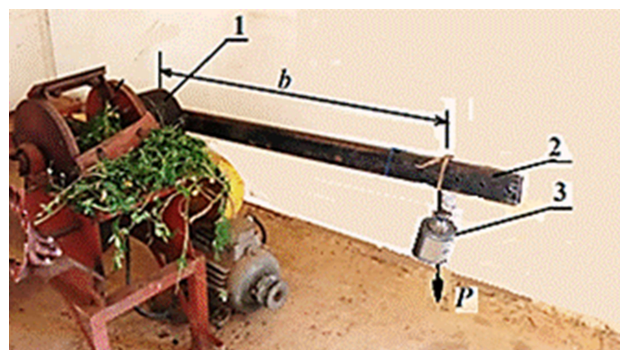
En estos casos, la determinación del área de carga precisa abordarse de forma experimental, ya que la masa alimentada es compactada previamente por las cuchillas



**Figura 3.** Área de carga ( $F_{sra}$ ) durante el corte de masa vegetal sin sistema de alimentación forzada.

hasta que el nivel de compactación de la masa genere la resistencia requerida para que se produzca el corte. Esta vía de determinación es aplicada en este trabajo para el caso de la moringa.

Para la determinación experimental del área de carga durante la interacción cuchilla-masa vegetal, fue preparada una instalación (Fig. 4) consistente en un molino de tambor del que fue removida la carcasa exterior, la rampa de alimentación y el sistema de soplado de las partículas desmenuzadas, con vistas a tener acceso libre a la zona de corte.



**Figura 4.** Instalación empleada para la medición del área de carga en un molino de tambor alimentado con masa vegetal tomada de plantas de moringa.

Una palanca (2, Fig. 4), elaborada de un tubo rectangular de acero, fue provista de una abrazadera (1) para su acoplamiento a la polea concéntrica con el eje del tambor, de manera de proporcionar diferentes valores del momento  $M=P \cdot b$ , mediante la colocación de un peso calibrado (3) con posibilidad de correrse a lo largo de la barra. Una muestra de masa vegetal era colocada entre la sufridera de la garganta de alimentación y la cuchilla más próxima a ésta. Las muestras eran preparadas previamente (Fig. 5) de manera que llenaran el espacio de alimentación y que presentaran una longitud y peso uniformes, a la vez que sus dimensiones transversales, sin compactar, se adaptaran a la distancia entre la sufridera y la cuchilla.



**Figura 5.** Muestras de masa vegetal de moringa.

Partiendo de esa situación, el peso es alejado, incrementándose el brazo  $b$  hasta el momento en que el comienzo del corte de la porción de materia vegetal fuera inminente. En ese momento era fijado el brazo (2) y tomadas las medidas  $h_1$ ,  $h_2$  y  $b_s$  que se muestran en la Fig. 3, con una regla graduada de menor división de 1 mm. Con esos datos, el área de carga ( $F_{sra}$ ) correspondiente a un sistema de alimentación manual sin rodillos alimentadores, era calculada por la expresión:

$$F_{sra} = b_s \cdot \frac{h_1 + h_2}{2} \quad (3)$$

El tamaño de la muestra ( $n_m$ ) fue calculado (con los datos resultantes de un pre-experimento realizado con 10 muestras) para un nivel de significación de 0,05 y un error de la media del 10%, de acuerdo a la expresión basada en la distribución de Student:

$$n_m = \frac{\sigma^2 \cdot t^2}{\Delta^2} \quad (4)$$

donde:

$\sigma$ : desviación media cuadrática.

$t$ : criterio t de Student

$\Delta$ : error de la media esperado.

El cálculo, realizado con los datos obtenidos a partir del pre-experimento previo, arrojó un tamaño de muestra  $n_m = 12,19$ , procesándose en total 15 muestras.

### Densidad de la masa procesada

La densidad volumétrica de los bultos de moringa a procesar fue determinada en dos condiciones:

- Densidad en estado descompactado ( $\gamma_d$ ), que es el estado natural de la masa vegetal previo a su introducción en la garganta del molino, compuesta por una mezcla de tallos, ramificaciones y hojas.
- Densidad en estado compactado ( $\gamma_c$ ), ocupando el área de carga entre la cuchilla y la sufridera, previo al corte inminente.

Para la determinación de  $\gamma_d$ , las muestras preparadas en bultos (Fig. 5) eran pesadas con una balanza digital de precisión hasta 0.1 g.

En ambas condiciones, la densidad se determinó dividiendo la masa de la muestra entre su volumen. En el caso de las muestras sin compactar, el volumen se determinó midiendo con una cinta de tela, con menor división de 1 mm, el perímetro del bulto sin aplastar, calculando el área de la sección de cada muestra. Al multiplicar esta área por la longitud media de cada bulto, se obtenía su volumen.

En el caso de la determinación de la densidad compactada, el área de la sección del bulto correspondía al área de carga  $F_{sra}$  determinada por la expresión 3

El cálculo del tamaño de la muestra para esta determinación se efectuó con el mismo procedimiento empleado para la determinación del área de carga,

aplicando la expresión 4 para un nivel de significación de 0.05 y un error de la media de 10% resultando  $n_m = 9$ , no obstante, se procesaron las mismas 15 muestras.

### Ángulo de fricción

El Ángulo de fricción de la masa vegetal con el material de la sufridera se determinó a través de la medición del ángulo de fricción estático, empleando un plano inclinado con ángulo variable, colocando sobre éste una superficie de acero del mismo material y acabado de los de la sufridera. El ángulo de deslizamiento inminente era medido con un semicírculo graduado con menor división de 1°. El tamaño de la muestra, determinado mediante la expresión 4 resultó  $n_m = 14$ , para un nivel de significación de 0,05 y un error de la media del 5%, tomándose un tamaño de muestra  $n_m = 20$ .

Partiendo de la determinación del ángulo de fricción estático, se determina el ángulo de fricción dinámico aplicando la tendencia en la diferencia entre estos dos parámetros para el caso de interacción de masa vegetal con acero, determinada por Rieznik (1964), así como por Valdés et al. (2010), pudiendo arribarse a la siguiente relación  $r\phi$  entre el ángulo de fricción estático ( $\phi_e$ ) y dinámico ( $\phi_d$ ):

$$r_\phi = \frac{\phi_e}{\phi_d} = 1,6 \div 2,2 \quad (5)$$

En esta investigación se aplica un valor medio para este intervalo, quedando la relación como:

$$r_{\phi m} = \frac{1,6 \div 2,2}{2} = 1,9 \quad (6)$$

### Energía específica de corte

En el caso de la Energía Específica de Corte ( $A_e$ ) no está determinada para el caso particular de la moringa, por lo que su valor es estimado tomando como referencia resultados experimentales reportados por Rieznik (1964) para tallos de plantas forrajeras de grosor entre 3 y 15 mm, obtenidos a velocidades de corte hasta 25 m/s con cuchillas estandarizadas, reportando valores de esta propiedad que oscilan entre  $0,6 \cdot 10^4$  y  $2,4 \cdot 10^4$  N·m/m<sup>2</sup>, correspondiendo los menores valores a las mayores velocidades de corte.

### Método aplicado para la evaluación de los modelos elaborados

Con vistas a facilitar la evaluación de los modelos elaborados para el cálculo de las relaciones carga-capacidad de paso del molino y de las condiciones de succión de la masa vegetal durante su interacción con las cuchillas de corte, las expresiones derivadas de la modelación fueron programadas mediante el software Mathcad 2000 Professional. De esta manera, introduciendo a los programas elaborados los parámetros o propiedades que constituyen variables de entrada a los modelos, se obtienen como salida los parámetros objeto de determinación en forma expedita.

## Método aplicado para la elaboración estadística de los resultados experimentales

Los resultados de las corridas experimentales realizadas para la determinación del área de carga, la densidad de la masa compactada y el ángulo de fricción, fueron elaborados estadísticamente, determinándose, para el total de las muestras sometidas a medición en cada caso, el valor medio, la desviación media cuadrática y el error de la media para un nivel de significación de 0,05.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Modelación del proceso de succión de la masa vegetal

El control de la succión de la masa vegetal en molinos forrajeros de alimentación manual constituye un aspecto de suma importancia en la obtención de un calibre controlado y uniforme de las partículas desmenuzadas (Martínez et al., 2004a; Martínez, 2019).

Un modelo Martínez y Valdés (2004) que esclarece satisfactoriamente qué parámetros influyen en la succión del material de manera tal que pueda incidirse en su control, con vistas a obtener tamaños adecuados de las partículas desmenuzadas y elaborado específicamente para el procesamiento de tallos gruesos, es adaptado en este trabajo, con vistas a su aplicación durante el procesamiento de una mezcla de masa vegetal compuesta de tallos, ramificaciones y hojas, como es el caso de la moringa.

El objetivo fundamental de este modelo consiste en determinar los parámetros que influyen en la succión de la masa autoalimentada por el órgano desmenuzador de los molinos forrajeros y establecer las expresiones correspondientes que permitan calcular dichos parámetros.

Para el análisis se parte de la hipótesis de que en el proceso de corte debe existir una componente de la fuerza de interacción de las cuchillas con la masa vegetal, en la dirección de la alimentación de la masa al órgano de corte, que sea capaz de "arrastrar" la masa alimentada con una velocidad media tal que asegure el flujo correspondiente a la capacidad de paso del órgano de corte. Una segunda hipótesis consiste en plantear que el trabajo realizado por esta componente de la fuerza de corte en la dirección de la alimentación, se invierta en proporcionar cierta energía cinética a la masa alimentada, la cual adquirirá una velocidad dada en la dirección de la alimentación, lo que en definitiva provoca el efecto de succión.

La Fig. 6 muestra la interacción del órgano de corte con la masa vegetal en el plano perpendicular al plano de corte. Nótese que, para ser consecuentes con la primera hipótesis planteada se ha previsto, en el caso del órgano de tambor, una excentricidad ( $e$ ) del eje de rotación del rotor con respecto a la línea de alimentación (eje  $x$ ).

Bajo estas condiciones, la fuerza de corte ( $P_{cor}$ ) se descompone en una componente vertical ( $P_{cor} \cdot \cos \alpha$ ) que se invierte en el corte propiamente dicho y otra horizontal ( $P_{cor} \cdot \sin \alpha$ ) que se invierte en el arrastre de la masa vegetal. También actúan sobre el cuerpo libre de la masa alimentada, las componentes normales ( $N$ ) y horizontal (fuerza de fricción  $F$ ) de la reacción de la sufridera. En el modelo se desprecia el efecto del peso de la fracción de masa en la zona de corte.

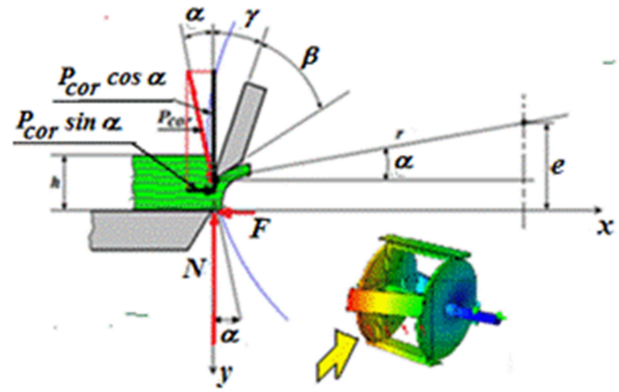


Figura 6. Esquema de la interacción cuchilla-masa vegetal-sufridera.

Como primera condición para la succión del material debe cumplirse que:

$$P_{cor} \cdot \sin \alpha > F_{max}, N \quad (7)$$

donde  $F_{max}$ : fuerza de fricción máxima,  $N$ .

$$F_{max} = N \cdot \tan \varphi, N \quad (8)$$

siendo  $\varphi$  el ángulo de fricción entre la masa vegetal y el material de la sufridera.

El ángulo de fricción debe considerarse dinámico ( $\phi_d$ ) preferiblemente, dado el carácter también dinámico de la interacción entre la sufridera y la masa vegetal cuando ésta es golpeada y arrastrada por las cuchillas.

Como quiera que:

$$N = P_{cor} \cdot \cos \alpha, N \quad (9)$$

entonces, sustituyendo 8 y 9 en 7, se obtiene que:

$$\begin{aligned} P_{cor} \cdot \sin \alpha &> P_{cor} \cdot \cos \alpha \cdot \tan \varphi \\ \tan \alpha &> \tan \varphi \\ \text{o sea: } \alpha &> \varphi \end{aligned} \quad (10)$$

Esto quiere decir que, como primera condición para que exista la posibilidad de succión de la masa vegetal por el órgano de corte, es necesario que el ángulo  $\alpha$  entre la dirección de la fuerza de corte y la perpendicular al plano de la sufridera deba ser mayor que el ángulo de fricción entre la masa vegetal y el material de la sufridera.

Esta condición es necesaria pero no suficiente, ya que para que se produzca el movimiento de la masa vegetal en la dirección y sentido de la alimentación, es preciso que ésta adquiera una velocidad en ese sentido y que, además, esta velocidad tenga determinada correspondencia con el flujo de diseño (capacidad de paso,  $q_0$ ) del molino, así como que garantice el calibre ( $\Delta L$ ) deseado de las partículas desmenuzadas.

Aplicando el principio del trabajo y de la energía puede plantearse según Martínez *et al.* (2004a) que el trabajo de la componente horizontal de la resultante de las fuerzas se invierte en proporcionar energía cinética a la masa alimentada, disipándose además una parte de la energía por el efecto de la fricción, o sea:

$$(P_{cor} \cdot \sin \alpha - F_{max}) \cdot \Delta L = \frac{1}{2} m (V_{al})^2 \quad (11)$$

donde m: valor medio de la masa del material alimentado, kg.

Este valor de la masa alimentada puede determinarse como:

$$m = F_{sra} \cdot \frac{L_t}{2} \cdot \gamma_c, \text{ kg} \quad (12)$$

siendo  $L_t$ , la longitud del bulto de tallos alimentados, m.

El área de carga  $F_{sra}$  corresponde a un sistema de alimentación manual sin rodillos alimentadores y se determina experimentalmente, evaluándose según la expresión 3, mientras que la densidad de la masa compactada  $\gamma_c$  también es determinada experimentalmente en el marco de este trabajo.

Volviendo a la expresión 11, el calibre de las partículas desmenuzadas ( $\Delta L$ ) y la velocidad media de la masa alimentada ( $V_{al}$ ), correspondiente a un flujo  $q_o$  (kg/s) igual a la capacidad de paso del molino, están relacionados según la expresión;

$$V_{al} = \frac{\Delta L \cdot Z \cdot n}{60}, \text{ m/s} \quad (13)$$

La velocidad media que debe tener la masa alimentada se determina, asimismo, en función del flujo de material, como:

$$V_{al} = \frac{q_o}{F_{sra} \cdot \gamma_c}, \text{ m/s} \quad (14)$$

Por otro lado, en el eje vertical puede plantearse que:

$$(P_{cor} \cdot \cos \alpha) \cdot \Delta s = F_{sra} \cdot A_e, \text{ N} \quad (15)$$

de donde, la fuerza de corte puede determinarse como:

$$P_{cor} = \frac{F_{sra} \cdot A_e}{\Delta s \cdot \cos \alpha}, \text{ N} \quad (16)$$

siendo

$A_e$ : la energía específica de corte del producto procesado,  $\text{N.m/m}^2$

$\Delta s$ : el desplazamiento de la fuerza de corte durante al contacto del filo de la cuchilla con la masa alimentada, m,

Resolviendo para  $\alpha$  el sistema de ecuaciones 9 a 16, se obtiene que:

$$\alpha = \tan^{-1} \left[ \tan \varphi_d + \frac{L \cdot q_o^2 \cdot \Delta s}{4 \cdot A_e \cdot F_c^2 \cdot \gamma_c \cdot \Delta L} \right], \text{ rad} \quad (17)$$

La expresión 17 permite determinar el ángulo  $\alpha$  que garantiza una velocidad media de succión correspondiente al flujo  $q_o$  (kg/s), garantizando además el calibre  $\Delta L$  medio deseado para las partículas desmenuzadas. El valor de  $\alpha$  depende de propiedades físico mecánicas de la masa alimentada tales como:  $A_e$ ,  $\gamma_c$  y de la longitud del bulto de tallos alimentados, así como del área de carga  $F_{sra}$ .

El desplazamiento de la fuerza de corte ( $\Delta s$ ) durante la ejecución del trabajo de corte, puede determinarse aproximadamente mediante la semisuma de los recorridos extremos de la cuchilla ( $h_1$  y  $h_2$ , Fig. 3), o sea:

$$\Delta s = \frac{h_1 + h_2}{2} \quad (18)$$

En cuanto al flujo  $q_o$  del material procesado por la máquina, su determinación será tratada a continuación.

#### Modelación para el cálculo de la relación carga-capacidad de paso

En el caso de los molinos de procesamiento de forraje para la alimentación animal, para el cálculo de la carga se parte de la masa de material procesado ( $G$ , kg/día) que se consume diariamente en una instalación pecuaria:

$$G = Q \cdot g, \text{ kg/día} \quad (19)$$

Siendo:

$Q$ - la cantidad de animales a alimentar;

$g$ - el consumo diario de cada animal. kg/día.

Si se define  $T$  (h/día) como el tiempo de funcionamiento diario de la máquina desmenuzadora, durante el cual debe procesarse el alimento necesario para un día, entonces la carga  $q$  (kg/s) del órgano de trabajo estará dada por:

$$q = \frac{Q \cdot g}{3600 \cdot T}, \text{ kg/s} \quad (20)$$

Por otro lado, la capacidad de paso  $q_o$  (kg/s) del órgano desmenuzador, dependerá de un conjunto de parámetros constructivos y de operación del molino, así como de propiedades de la masa vegetal y del calibre exigido para el producto procesado, tales como:

- El número de cuchillas en el tambor o disco ( $Z$ );
- La velocidad de rotación del órgano de corte ( $n$ , rev/min);
- El área de carga que enfrenta una cuchilla en cada corte ( $F_{sra}$ ,  $\text{m}^2$ );
- La densidad de la masa vegetal al momento del corte ( $\gamma_c$ ,  $\text{kg/m}^3$ );
- La longitud de las partículas desmenuzadas ( $\Delta L$ , m).



Es procedente aclarar que, en el caso objeto de estudio, se toma como área de carga ( $F_{sra}$ ) la correspondiente a un molino de tambor sin rodillos alimentadores y procesando una masa vegetal mixta, compuesta de tallos de poco grosor, ramificaciones y hojas, como la representada en la **Figura 3**. Asimismo, la densidad de la masa al momento del corte ( $\gamma_c$ ) se corresponde con estas condiciones.

El volumen de tallos  $V_n$  ( $m^3/rev$ ) cortado en una revolución del órgano de corte, estará dado por:

$$V_n = F_{sra} \cdot \Delta L \cdot Z, m^3/rev \quad (21)$$

Entonces el volumen procesado en la unidad de tiempo  $V_t$  ( $m^3/s$ ) será:

$$V_t = F_{sra} \cdot \Delta L \cdot Z \cdot n \cdot \frac{1}{60}, m^3/s \quad (22)$$

y la masa de tallos que puede ser procesada en la unidad de tiempo por el órgano de trabajo (capacidad de paso) estará dada por:

$$q_o = F_{sra} \cdot \Delta L \cdot Z \cdot n \cdot \frac{1}{60} \cdot \gamma_c, kg/s \quad (23)$$

Como es conocido, durante el cálculo de los parámetros de las máquinas desmenuzadoras de forraje, al igual que en otros órganos de trabajo de máquinas cosechadoras o procesadoras de productos, debe garantizarse la coincidencia entre la carga  $q$  y la capacidad de paso  $q_o$ , de manera de evitar atoros y garantizar un trabajo eficiente del equipo.

### Resultados de la determinación experimental de las propiedades de la moringa

La **Tabla 1** muestra los estadígrafos obtenidos durante la determinación experimental del área de carga ( $F_{sra}$ ) de la masa vegetal de moringa, durante su procesamiento en un molino de tambor sin alimentación forzada.

**Tabla 1.** Resultados de la determinación del área de carga  $F_{sra}$

	$h_1$ (cm)	$h_2$ (cm)	$b_1$ (cm)	Área de carga $F_{sra}$ , ( $cm^2$ )
Valor medio	1,65	6,92	24,5	105,02
Desv. Media Cuadrática	0,75	0,99	0,00	20,96
Error de la media				9,5
Tamaño de la muestra calculado				12
Tamaño de la muestra empleado				15
t de Student				1,75
Nivel de significación				0,05

Puede apreciarse que el valor medio del área de carga alcanzó  $105,02 cm^2$  con una desviación media cuadrática de  $20,96 cm^2$ , resultando un error de la media de  $9,5 cm^2$ , con un nivel de significación de 0,05.

Los resultados de la determinación de la densidad volumétrica de la moringa, tanto en forma natural al inicio del proceso de alimentación, como cuando sufre la compactación por las cuchillas previo al corte, se muestran en la **Tabla 2**.

**Tabla 2.** Resultados de la determinación de la densidad volumétrica de la masa vegetal de moringa

Estadígrafo	Densidad de la masa inicial, $\gamma_{sc}$ ( $kg/m^3$ )	Densidad compactada $\gamma_c$ ( $kg/m^3$ )
Valor medio	40,41	188,04
Desv. Media Cuadrática	5,39	32,78
Error de la media	4,04	9,8
Tamaño de la muestra calculado	3,85	9,30
Tamaño de la muestra empleado	15	15
t de Student	1,47	1,75
Nivel de significación	0,05	0,05

De la Tabla se aprecia que la densidad volumétrica de la moringa, cuando es compactada por la acción de las cuchillas hasta el momento inminente del corte, se eleva desde poco más de  $40 kg/m^3$ , hasta  $188 kg/m^3$ , superando en 4,6 veces la densidad del bulto en estado normal.

Los resultados de la determinación experimental del ángulo de fricción estático moringa-acero ( $\phi_e$ ), así como del cálculo del ángulo de fricción dinámico ( $\phi_d$ ) se muestran en la **Tabla 3**.

**Tabla 3.** Resultados de la determinación del ángulo de fricción moringa-acero

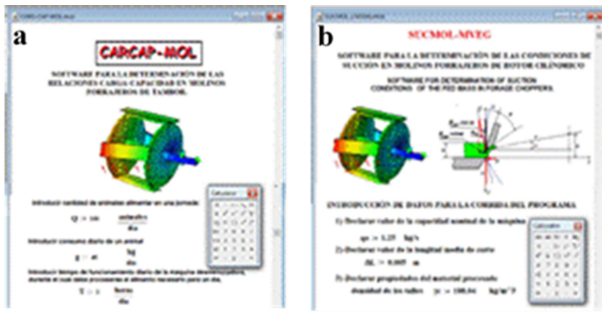
Estadígrafo	Ángulo de fricción moringa-acero	
	Estático, $\phi_e$ (°)	Dinámico, $\phi_d$ (°)
Valor medio	52,50	27,63
Desv. Media Cuadrática	5,64	
Error de la media	2,62	
Tamaño de la muestra calculado	13,67	
Tamaño de la muestra empleado	20	
t de Student	1,72	
Nivel de significación	0,05	

De la tabla se aprecia que el ángulo de fricción estático alcanza  $52,5^\circ$  con un error de la media de  $2,62^\circ$ , para un nivel de significación de 0,05, lo cual significa que existe un 95% de probabilidad de que la media de la población se encuentre entre  $49,88^\circ$  y  $55,12^\circ$ . Asimismo, se obtiene que el ángulo de fricción dinámico resulta aproximadamente la mitad del estático.

### Resultados de la evaluación de los modelos elaborados

En la **Fig. 7** se muestran capturas de pantalla de la primera página de los softwares elaborados para el cálculo de los parámetros que garantizan, por un lado, las relaciones adecuadas carga-capacidad, y por otro,





**Figura 7.** Captura de pantalla tomada de los softwares elaborados: a) Para el cálculo de relaciones carga -capacidad; b) Para el cálculo de condiciones de succión.

las condiciones de succión requeridas para un trabajo eficiente de un molino de tambor, durante el procesamiento de una masa vegetal mixta, compuesta de tallos de poco grosor, ramificaciones y hojas.

En los softwares han sido programadas las expresiones desarrolladas para el cálculo de las relaciones carga-capacidad y las condiciones de succión de la masa vegetal, de manera de obtener, en forma expedita, las variables de salida deseadas, en función de las variables de entrada que se vayan declarando. En este caso, los programas han sido aplicados introduciendo las propiedades de la moringa, con vistas a la obtención de los parámetros de operación del molino que garanticen un trabajo eficiente durante el procesamiento de esta masa vegetal.

Como datos de entrada al programa CARCAP-MOL, fueron declarados los siguientes:

- Cantidad de animales a alimentar en una jornada:  $Q = 100$  animales/día.
- Consumo diario de un animal:  $g = 40$  kg/día.
- Tiempo de funcionamiento diario del molino:  $T = 1$  h/día.
- Longitud media de las partículas a desmenuzar:  $\Delta L = 0,005$  m.
- Velocidad de rotación del tambor picador:  $n = 1900$  rev/min.
- Número de cuchillas del tambor picador:  $Z = 4$
- Densidad de la masa vegetal compactada:  $\gamma_c = 188,04$  kg/m<sup>3</sup>.
- Área de carga:  $F_{sra} = 0.0105$  m<sup>2</sup>.

Para esos datos de entrada, se obtiene como salida:

- Carga de la máquina:  $q = 4 \cdot 10^3$  kg/h.
- Capacidad de paso:  $q_o = 1,25$  kg/s =  $4,5 \cdot 10^3$  kg/h.

Comprobándose que la carga no exceda la capacidad de paso de la máquina.

Para la evaluación del programa SUCMOL-MVEG, se introducen como datos de entrada los siguientes:

- Capacidad de paso:  $q_o = 1,25$  kg/s.
- Longitud media de las partículas a desmenuzar:  $\Delta L = 0,005$  m.
- Densidad de la masa vegetal compactada:  $\gamma_c = 188,04$  kg/m<sup>3</sup>.

- Energía específica de corte:  $A_e = 0,6 \cdot 10^4$  N.<sup>o</sup>/m<sup>2</sup>.
- Área de carga:  $F_{sra} = 0.0105$  m<sup>2</sup>
- Ángulo de fricción moringa-acero:  $\phi_d = 27, 63^\circ$ .
- Longitud del bulto de la masa vegetal alimentada:  $L = 0.75$  m.
- Diámetro del tambor (al nivel del filo de las cuchillas):  $D = 0,34$  m.
- Ancho interior del tambor:  $b_i = 0,245$  m.
- Ángulo de las cuchillas (Fig.3):  $\theta = 10^\circ = 0,175$  rad.
- Distancia menor de la cuchilla a la sufridera al comienzo del corte:  $h_1 = 1,65 \cdot 10^{-2}$  m.
- Distancia mayor de la cuchilla a la sufridera al comienzo del corte:  $h_2 = 6,92 \cdot 10^{-2}$  m.

Con estos datos de entrada, el programa brinda como resultado el cálculo del ángulo  $\alpha$  entre la dirección de la fuerza de corte y la perpendicular al plano de la sufridera, según la [expresión 17](#), que garantiza una velocidad media de succión correspondiente al flujo  $q_o$  (kg/s), garantizando además el calibre  $\Delta L$  medio deseado para las partículas desmenuzadas.

Asimismo, ofrece el resultado de comprobación del cumplimiento de la primera condición para que exista la posibilidad de succión de la masa vegetal por el órgano de corte, comprobando si el ángulo  $\alpha$  obtenido es superior al ángulo de fricción, obteniéndose en este caso que:

$$\alpha = 28,53^\circ > \phi_d = 27,63^\circ$$

Por último, el programa ofrece como resultado, el valor de la excentricidad  $e$  (Fig. 6) del eje del tambor, respecto al plano de la sufridera, que constituye el parámetro de regulación indicado para lograr el ángulo  $\alpha$  deseado. En este caso, el valor obtenido es  $e = 0,103$  m.

## CONCLUSIONES

- Se obtiene, mediante la modelación mecánico-matemática conceptual de la interacción de un órgano de corte de un molino forrajero del tipo de tambor, sin alimentación forzada, las expresiones que permiten calcular los parámetros de diseño y operación del molino que garanticen un efecto de succión eficiente, con un flujo de material y calibre de las partículas requeridos, durante el procesamiento de una masa vegetal compuesta por tallos de pequeño grosor, ramificaciones y hojas.
- Se determina experimentalmente, para una masa vegetal compuesta por tallos, ramificaciones y hojas de moringa (*M. oleifera*), parámetros y propiedades que se requieren como datos de entrada a los modelos elaborados, tales como: el área de carga, la cual alcanza un valor medio de  $105$  cm<sup>2</sup>; la densidad de la masa compactada durante la acción de corte, que alcanza un valor medio de hasta  $188$  kg/m<sup>3</sup>,

superando en 4,6 veces la densidad de la masa en estado normal y el ángulo de fricción estático de la masa vegetal con el acero, que alcanza un valor medio de 52,5°, disminuyendo hasta 27,63° bajo condiciones dinámicas.

- Se efectúa la programación computarizada de los modelos matemáticos elaborados, con vistas a facilitar su evaluación. Como resultado de la evaluación de los modelos, con datos relativos al procesamiento de moringa en un molino forrajero de tambor, disponible en las granjas ganaderas de Cuba, se obtuvo que, fijando un valor en la excentricidad del eje del tambor de 0,103 m, con relación al nivel de la sufridera, se garantiza el flujo de material y tamaño de partículas requeridos.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALFIOROV, C.; PARA, J.; ARGÜELLES, J.; DÍAZ, R.: "Investigación del proceso de corte de la bermuda cruzada con órganos de corte rotatorios de eje vertical", *Ciencia y Técnica en la Agricultura, Serie Mecanización, La Habana. Cuba*, 4(1), 1981.
- ALVARADO, E.; JOAQUÍN, S.; ESTRADA, B.; MARTÍNEZ, J.; HERNÁNDEZ, J.: "Moringa oleifera Lam.: Una alternativa forrajera en la producción pecuaria en México", *Agro Productividad*, 11(2): 106-110, 2018.
- BARRIENTOS-RIVERA, J.L.; CALZADA-TORRES, A.J.; SOTO-CUETO, K.G.: "Diseño de una máquina picadora y recolectora de forraje con cuchillas simples para tractores agrícolas en el Valle del Mantaro", 2023.
- BASHAR, M.K.; HUQUE, K.S.; SARKER, N.R.; SULTANA, N.: "Quality assessment and feeding impact of Moringa feed on intake, digestibility, enteric CH<sub>4</sub> emission, rumen fermentation, and milk yield", *Journal of Advanced Veterinary and Animal Research*, 7(3): 521, 2020, DOI: <https://doi.org/10.5455/javar.2020.g449>.
- BASOI, E.; VERNIAYER, O.; SMIRNOV, I.; SHAX, E.S.: "Teoría, construcción y cálculo de maquinaria agrícola", *Editorial Construcción de Maquinaria. Moscú*, 1976.
- CARMOLINGA, J.: *Propuesta de una Máquina Ensiladora (Picadora de Forraje) para la Alimentación Animal*, Inst. Universidad Autónoma Chapingo, Departamento de Ingeniería Mecánica Agrícola, Informe técnico, Texcoco de Mora, Edo. México, México, 1995.
- FERNÁNDEZ, E.; MARTÍNEZ, A.: "Modelo matemático para la determinación de la potencia consumida en el proceso tecnológico de corte de tallos mediante órganos de cortes rotacionales de eje horizontal", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias (Cuba)*, 1(3): 79-88, 1988.
- GARAVITO, U.: "Moringa oleifera, alimento ecológico para ganado vacuno, porcino, equino, aves y peces, para alimentación humana, también para producción de etanol y biodiesel", 18, 2008, *Disponible en:* <http://www.engormix.com/MAavicultura/nutricion/articulos/moringaoleifera-t1891/141-p0.htm>.
- KEKANA, T.; MARUME, U.; MUYA, C.; NHERERA, F.: "Lactation performance and blood metabolites in lactating dairy cows micro-supplemented with Moringa oleifera leaf meal", *South African Journal of Animal Science*, 49(4): 709-716, 2019, ISSN: 2221-4062, DOI: <https://doi.org/10.4314/sajas.v49i4.12>.
- KOEGEL, R.; SHINNERS, K.; WALL, S.; FRONCZAK, F.; STRAUB, R.: "Radial blade and anvil forage cutterhead", *Transactions of the ASAE*, 33(3): 695-0706, 1990.
- MARTÍNEZ, A.; VALDÉS, P.; DÍAZ, J.; MATURELL, Y.; VEGA, D.: "Determinación de las condiciones de succión de la masa vegetal en los molinos desmenuzadores de tallos", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 13(4): 1-10, 2004a, ISSN: 1010-2760.
- MARTÍNEZ, A.; VALDÉS, P.; SUÁREZ, J.D.; MATURELL, Y.; VEGA, D.: "Modelo matemático racional para el cálculo de la potencia consumida en molinos forrajeros de tambor", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 13(4): 0, 2004b, ISSN: 1010-2760.
- MARTÍNEZ, R.A.: *Contribución a la Modelación Matemática Racional Dirigida al Cálculo de Parámetros en Procesos de Aplicación en la Agricultura, [en línea]*, Universidad Agraria de La Habana (UNAH), Tesis en opción al grado científico de Doctor en Ciencias de Segundo Grado (Dr.Cs.), La Habana, Cuba, 2007, *Disponible en:* <https://evea.unah.edu.cu>.
- MARTÍNEZ, R.A.: *Libro de Texto Complementario: Cálculo de Parámetros en Máquinas Agrícolas Asistido por Computadora, [en línea]*, Ed. Entorno Virtual de Enseñanza-Aprendizaje (EVEA). Universidad Agraria de La Habana, vol. II Capítulo, San Jose de las Lajas Mayabeque, CUBA, 65-66 p., 2019, *Disponible en:* <https://evea.unah.edu.cu>.
- MARTÍNEZ, R.A.; VALDÉS, H.P.: "Determinación de las condiciones de succión de la masa vegetal en molinos desmenuzadores de tallos", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 13(4), 2004, ISSN: 2071-0054.
- OLSON, M.E.; FAHEY, J.W.: "Moringa oleifera: un árbol multiusos para las zonas tropicales secas", *Revista mexicana de biodiversidad*, 82(4): 1071-1082, 2011, ISSN: 1870-3453.
- PADILLA, C.; FRAGA, N.; SUÁREZ, M.: "Efecto del tiempo de remojo de las semillas de moringa (Moringa oleifera) en el comportamiento de la germinación y en indicadores del crecimiento de la planta", *Revista Cubana de Ciencia Agrícola*, 46(4): 419-421, 2012, ISSN: 0034-7485.
- RIEZNİK, N.: "Combinadas Silo cosechadoras, Teoría y Cálculo", *Editorial MIR-Moscú. (en ruso)*, 1964.

- RIZWAN, N.; RIZWAN, D.; BANDAY, M.: “Moringa oleifera: The miracle tree and its potential as nonconventional animal feed: A review”, *Agricultural Reviews*, 45(3): 369-379, 2024, ISSN: 0253-1496.
- SÁBLIKOV, M.: “Investigación del Proceso de Corte de Tallos con Cuchillas”, *Mecanización y Electrificación de la Agricultura*, (2), 1963.
- SHINNERS, K.; KOEGEL, R.; PRITZL, P.: “An upward cutting cut-and-throw forage harvester to reduce machine energy requirements”, *Transactions of the ASAE*, 34(6): 2287-2290, 1991.
- SU, B.; CHEN, X.: “Current status and potential of Moringa oleifera leaf as an alternative protein source for animal feeds”, *Frontiers in veterinary science*, 7: 53, 2020, ISSN: 2297-1769, DOI: <https://doi.org/10.3389/fvets.2020.00053>.
- VALDÉS, P.A.; MARTÍNEZ, A.: “Software para la determinación racional de los parámetros de trabajo de las picadoras de forraje del tipo tambor con alimentación manual”, *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 20(2): 80-85, 2011, ISSN: 2071-0054.
- VALDÉS, P.A.; MARTÍNEZ, A.; VALENCIA, Y.; BRITO, E.: “Influencia del momento de inercia del tambor y de diferentes ángulos de alimentación constantes sobre el calibre de las partículas de forraje procesado con picadores del tipo de tambor con alimentación manual. Parte I”, *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 19(3): 53-56, 2010, ISSN: 2071-0054.
- VALDÉS, P.A.; MARTÍNEZ, A.; VALENCIA, Y.; BRITO, E.: “Validación del modelo de cálculo de la potencia consumida por las picadoras de forraje del tipo de tambor con alimentación manual”, *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 21(2): 05-10, 2012, ISSN: 2071-0054.