

MECANIZACIÓN AGRÍCOLA

ARTÍCULO ORIGINAL

Sistema de máquinas para extracción y procesamiento de yuca (*Manihot esculenta* L. Crantz) según sus propiedades

Machinery for extraction and processing of cassava (Manihot esculenta L. Crantz) according to their properties

Dr.C. Annia García-Pereira¹, M.Sc. Ellys Petrocelli^{II}, Dr.C. Jorge García Coronado^I, M.Sc. Yolanda Sabin-Rendón^I, Dr.C. Antihus Hernández-Gómez^I,

^IUniversidad Agraria de La Habana (UNAH), Facultad de Ciencias Técnicas, San José de las Lajas, Mayabeque, Cuba.

^{II}Universidad Politécnica Territorial “José Antonio Anzoátegui”, El Tigre, Edo. Anzoátegui, Venezuela

RESUMEN. La siguiente investigación tienen como objetivo proponer el sistema de máquinas para la mecanización o procesamiento de la yuca (*Manihot esculenta*, Crantz) según las propiedades fenotípicas y físico-mecánicas de las variedades La Reyna y Paigua Negra. En el estudio se determinan: altura total del arbusto (Hta); altura de la aparición del follaje (Haf); longitud de la raíz máxima (Lrm); diámetro del conjunto de raíces (Dr); el peso total de la planta (Ptp), profundidad de las raíces (Pr); longitud de la raíz máxima (Lrm); diámetro del conjunto raíz (Dcr), la resistencia a la extracción (Re), la firmeza (F) y resistencia a la ruptura (Rr), entre otras. Los resultados muestran que La variedad Paigua Negra posee propiedades ligeramente superiores sobre la variedad La Reyna para la mecanización y/o procesamiento de su cultivo, sin embargo La Reyna posee mayor resistencia a la compresión y a la ruptura de la corteza con valores superiores en un 30%.

Palabras clave: Yuca, Propiedades físico - mecánicas, Mecanización de la yuca.

ABSTRACT. The research aim is to propose the machinery system for the cassava (*Manihot esculenta* Crantz), varieties La Reyna y Paigua Negra mechanization or processing. In the study are determined properties such as: total height of bush (Hta); total height of appearance of foliage (Haf); length of maximum root (Lrm); diameter of the bunch of roots (Dr), total weight of the plant (Ptp), depth of roots (Pr); length of maximum root (Lrm); diameter of root (Dcr) and high-extraction strength (Re); firmness (F) and rupture resistance strength (Rr), among others. The results show that Paigua variety has properties slightly better for the mechanization than La Reyna, however this last is 30% more resistant to compression and skin rupture strength.

Keywords: mechanical-physical properties, cassava, cassava mechanization.

INTRODUCCIÓN

El comportamiento de las propiedades físico-mecánicas de cualquier producto agrícola es uno de los elementos que sienta las pautas para enfrentar los procesos de mecanización y procesamiento agroindustrial de cada variedad en cuestión¹. Específicamente durante el estudio de la yuca con vistas a los

procesos antes mencionados se hace necesario tener en cuenta un grupo de propiedades físicas que caracterizan al arbusto, su tallo y las raíces como elemento en el cual se centra la mayor atención (Adetan *et al.*, 2003). En algunos casos se hace necesaria la combinación de más de una parte de la planta para el análisis.

¹ PETROCELLI, E.: Propiedades físico- mecánicas de la yuca (*Manihot esculenta* L. Crantz) variedades La Reyna y Paigua Negra en el estado Anzoátegui, Venezuela, Universidad Politécnica Territorial «José Antonio Anzoátegui», Tesis de Maestría, Anzoátegui, Venezuela, 2015.

Un ejemplo de esto lo representa el conjunto tallo-raíz ya que la mecanización de la cosecha de la yuca se realiza siguiendo los siguientes pasos: primero, corte del follaje del arbusto y segundo, extracción del conjunto tallo-raíz (Henry *et al.*, 1998; FAO, 2010).

Las propiedades físicas aéreas para esta investigación están referidas a ramas y tallos (Engels, 1981). El tamaño de la planta es uno de los caracteres más importantes desde el punto de vista de las labores culturales en las que se requieren penetrar en el cultivo y la cosecha, y se prefieren genotipos con altura de planta y ramificación de intermedia a altos².

Características de las condiciones experimentales

En la práctica de esta investigación, se selecciona un área experimental ubicada en “La escuela técnica agropecuaria Bolivariana” (ETAB), situada en el Municipio “San José de Guanipa”, Estado Anzoátegui, Venezuela. Las características Agroecológicas de la unidad fisiográfica donde se sitúa el ensayo experimental corresponden a las formaciones denominadas **Mesas**. Para este estudio se tiene en cuenta que la distribución espacial del cultivo está relacionada con la formación del número de raíces por planta, diámetro y longitud, en sus primeros estadios, causada por densidad de siembras menores³. La densidad de plantas para la variedad dulce es de 10.000 plantas/ha, para ancho entre hileras y plantas de 1 x 1 m; mientras que para la amarga 12.500 plantas/ha, distancia entre hileras y plantas de: 0,90 m x 1 m.

El arreglo de la superficie, para el muestreo de las plantas (40 plantas 20 de cada variedad), se realiza en un área de aproximadamente una hectárea (ha)⁴. Posteriormente se analizaron las propiedades relacionadas con las raíces (total de 40 raíces, 20 por cada variedad) cuya determinación se realizó en el Laboratorio de mecánica e instrumentación de la Universidad Politécnica Territorial José Antonio Anzoátegui (UPTJAA).

MÉTODOS

Metodología para determinar las propiedades fenotípicas, físicas- mecánicas

Siguiendo el diseño experimental propuesto la determinación de las propiedades fenotípicas y físico-mecánicas se realizan según las metodologías propuestas por Ospina y Ceballos (2002), Fama *et al.* (2006), Yirat *et al.* (2009), Petrocelli (2015)⁵, ajustada a los manuales del CATIE (Engels, 1981) y CIAT⁴, a los cuales se le aplican algunas modificaciones.

La altura total (Ht), se toma desde el nivel del suelo, hasta la yema apical del mismo, con una cinta métrica, graduada en centímetros, en cada una de las variedades de yuca, en las dos áreas de muestreo, según el diagrama de cuadrículas (Melo y Vargas, 2002).

Altura hasta la base de copa o altura de reiteración (Htr): Es la longitud descrita entre la base del árbol y el punto de reiteración. Este último es definido como el punto sobre el tallo del árbol donde aparecen las primeras ramas verdaderas

(Hallé *et al.*, 1978). Conjuntamente con este valor y de gran importancia aparecen la **altura del follaje (Hf)** que no es más que la longitud sobre el tallo desde donde aparece la primera rama hasta el ápice y el **número de ramas por planta (Nr)**.

La masa total de la plantal (Mtp), es una tasa, que implica la estructura total desde la raíz el tronco y el follaje, para obtenerla se extrae la totalidad de ésta desde la profundidades del substrato; una vez retirada las partículas de arena adheridas a las raíces, pesándose la muestra contentiva de: raíces, tallo y ramas, incluidas las hojas, luego se corta de manera conjunta, el tallo antes del primer nudo y el resto de la planta, tomando el valor **tallo-rama (Mtr)**, en esa misma operación, se logra el **masa total de las raíces (Mr)**, allí mismo se cuentan en forma unitaria por planta.

El **número total de raíces por planta (Nrp)**, su **diámetro** (tanto para el **conjunto raíz (Dcr)** como para las **raíces individualmente (Dr)** y la **longitud de la raíz mayor (Lrm)** se han estudiado a razón del lograr una densidad óptima por hectárea en el cultivo y constituye, una forma económica de aumentar los rendimientos. El número de raíces por planta y el peso de la raíz son significativamente mayores a espaciamientos más amplios y ratifica la importancia de estas propiedades para el proceso de mecanización (Mojena y Bertolí, 2004).

La estimación del **diámetro del conjunto de raíces (Dcr)**, se determina ubicando el conjunto sobre una rejilla de proporciones 1 x 1m, y en cuyas regletas están marcadas las medidas en centímetros, una vez colocada la planta completa de forma vertical se marca el contorno y se adquieren las dimensiones en al menos tres puntos equidistantes empleando una cinta métrica. Para determinar el **diámetro del tallo principal (Dtp)**, se toma la medida en un punto del vástago principal, entre el suelo hasta cien cm de altura del mismo. La herramienta para este tipo de tasa consiste en un vernier, marca MANESMANN (Alemania), 0-150 ± 0.05mm, ajustado según la norma venezolana, COVENIM, 2814-91. El **diámetro promedio de la raíz (Dr)**, se determina, en tres partes diferentes de esta parte subterránea de la planta: basal, proximal y distal, extendiendo la cinta métrica a lo largo de la raíz promediando luego para obtener una única cantidad, con el uso de un vernier, cuya apreciación es de 0.05 mm.

La **longitud de la raíz máxima (Lrm)**, se obtiene midiendo con una cinta métrica, desde la parte basal de la estructura reservantes, inmediatamente donde termina el pedúnculo, y extendiendo el metro plegable lo largo, terminando la lectura en la parte distal de este órgano. La **profundidad de las raíces (Pr)**, se establece una vez que se extrae el conjunto total de las mismas, tomando en cuenta el patrón de distribución de estas en el suelo (vertical, horizontal) según sea característico de cada variedad.

Por otro lado, las **propiedades mecánicas**⁵, describe el modo en que esté responde a la aplicación de una fuerza o carga. Solamente se pueden ejercer tres tipos de fuerzas mecánicas que afectan a los materiales: *compresión*, *tensión* y *cizallamiento*.

El peso total de la planta (Ptp); del conjunto tallo-raíz (Ptr) y de las raíces (Pr), se obtiene de multiplicar **Mtp**, **Mtr** y **Mr** por la aceleración de la gravedad $g = 9,8 \text{ m/s}^2$.

² MONTALDO, A.: La yuca, trabajos sobre este cultivo con especial referencia a Venezuela, Maracay, Venezuela, pp. 7-12, 1972.

³ RODRÍGUEZ, S.: Interacción genotipo-ambiente, clasificación de ambientes y uso de diferentes métodos de estabilidad en yuca (*Manihot esculenta* Crantz), INCA, Tesis de Doctorado, La Habana, Cuba, 139 p., 1987.

⁴ CIAT: Manual de Morfología de la yuca, Guía de estudio, 1981.

⁵ VILLASEÑOR, C.: Análisis físico y mecánico de frutos de melón, Colegio de Posgraduados, Tesis de Doctorado, Texcoco, México, 2005.

La densidad aparente (ρ) demuestra la relación que se establece entre la masa y el volumen que ocupa una probeta en el espacio, esta propiedad se determina por el principio de Arquímedes, mediante el llenado de un tubo de ensayo, de volumen conocido, graduado en ml, con agua destilada, hasta el nivel determinado, pesadas, en una balanza electrónica, marca Mettler Toledo®, con una apreciación estimada en 0,01gr. Se introducen, las probetas y se toma el valor del volumen de líquido resultante desplazado.

Coefficiente de fricción estático: representa la relación que se produce entre la fuerza requerida para iniciar y mantener el movimiento en un cuerpo situado sobre una pendiente a un ángulo determinado⁶ (Ospina y Ceballos, 2002). Resulta de gran importancia para el diseño de máquinas agrícolas agroindustriales y estructuras de almacenamiento, así como operaciones de acondicionamiento, transporte y beneficio de productos agrícolas. También es importante para determinar las pérdidas de potencia debidas a la fricción con las superficies de los equipos y disminución de daños mecánicos (Ospina y Ceballos, 2002). Para determinar el coeficiente de fricción estático se parte del análisis de la Figura 1 y se emplea la expresión 1.

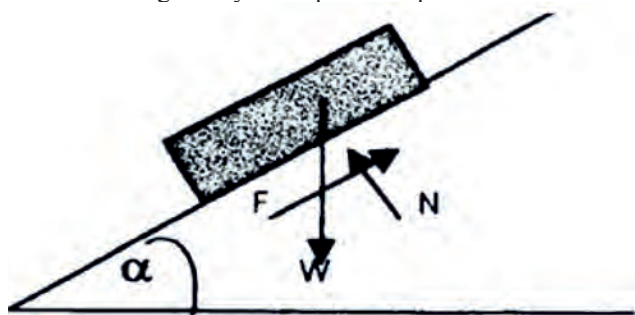


FIGURA 1. Plano inclinado para la determinación del coeficiente de fricción estático.

$$f = \tan \alpha \quad (1)$$

donde:

f - Coeficiente de fricción;

α - ángulo de fricción estático de la raíz.

Para su determinación se coloca una superficie de acero completamente limpia y nivelada, a través de un nivel de burbuja.

La superficie de ensayo se fija a la mesa y cada probeta de yuca (20 en total), es colocada en la superficie; la mesa es inclinada lentamente, por un dispositivo atornillado, hasta que el movimiento de la muestra inicie hacia abajo, la tangente del ángulo de fricción es el coeficiente de fricción, según la expresión 1.

Resistencia a la extracción (R_e): en el caso de la yuca que refiere a la resistencia que se establece por el conjunto tallo-raíces a ser removidas desde el suelo, es una propiedad de gran interés para la cosecha mecanizada y está estrechamente relacionada con otras propiedades como el peso del conjunto tallo raíz, la resistencia del suelo, longitud de las raíces entre otras, se obtiene con un dinamómetro de capacidad 240 kg, el instrumento se dispone en una barra de metal, a la que le es acoplado el peso en el centro de ésta sujetado con cuerdas en la parte superior; en la parte inferior la cuerda se ata al tallo principal de la planta, dos personas se encargan de aplicar la fuerza en los extremos de la palanca hasta lograr extraer el conjunto de raíces, registrándose la lectura en la cual la aguja del dispositivo de pesaje desciende en su punto máximo.

La firmeza o resistencia a la compresión (F) es una propiedad muy relacionada con la respuesta del producto ante daños físicos ocasionados por medios mecánicos durante la recolección, manipulación y transporte de cualquier producto agrícola; depende del estado de maduración, y define en algunos casos el método de recolección, esta propiedad varía notablemente durante periodos de almacenamiento a temperatura ambiente. Existen distintas técnicas para medir la firmeza, basadas en el método de ensayo, lo que propicia que en la literatura los autores se refieran a ella como: resistencia al **pinchazo**, **compresión**, **aplastamiento** y **penetración**, etc. En general los ensayos tradicionales de firmeza miden la fuerza que opone un material biológico al ser perforado o comprimido hasta cierta profundidad y deformación (Mohsenin, 1970; Buitrago *et al.*, 2004).

Resistencia a la compresión (F) y Resistencia a la ruptura (R_r) se determinan a las probetas comprimiéndolas el 3% de su longitud al ser comprimidas por su sección transversal, empleando el dispositivo marca GRIFFIN®, con probetas de forma cilíndrica, de dimensiones: longitud: 21,4 mm y diámetro: 10,8 mm (Figura 2); previamente descortezadas, y elaboradas con un dispositivo metálico para conservar medidas aproximadas de cada una, trabajadas a temperatura ambiente, según Yirat *et al.* (2009).



FIGURA 2. Ejemplo de probeta según las dimensiones y características para ambas variedades.

⁶ ASOEGWU, N.: Determination of some mechanical properties of cassava root: *Manihot esculenta* linn, University of Ife, M.Sc. Thesis, Nigeria, 1981.

La **Resistencia a la penetración de la corteza (Rc)** se determina siguiendo el mismo principio hasta lograr la ruptura de muestras de corteza utilizando un penetrómetro manual marca GRIFFIN® montado en un soporte para mantener la coherencia, realizándose una punción por probeta de corteza de raíz de yuca, de 25 x 65 mm aproximadamente, previamente lavadas, para evitar que las impurezas minimicen el grado de error en las medidas.

Los datos obtenidos de las pruebas experimentales son tabulados utilizando la herramienta Excel 7.0 de Microsoft office 7, y posteriormente procesados a través del software especializado STATGRAPHIC 5.1 (Statistical Graphics Crop, 2000).

Selección de un sistema de máquinas para la extracción, y procesamiento agroindustrial de la yuca en función de sus propiedades físico mecánicas

El diseño y selección de máquinas para la cosecha mecanizada o semi mecanizada se basa el conocimiento de las propiedades físico-mecánicas del producto agrícola en cuestión y si específicamente se aborda el tema de raíces tuberosas, el tipo de suelo será un factor determinante en la selección del tipo de máquina para la cosecha y la fuente motriz necesaria para que se desarrolle la labor satisfactoriamente⁷.

Alarcón y Dufour (1998), Mediante el análisis de los documen-

tos técnicos de diseño dado por autores y fabricantes se propone según las propiedades de las variedades estudiadas y sus principales propiedades físico-mecánicas, las máquinas que cumplen con las especificaciones técnicas para llevar a cabo la mecanización de la extracción desde el suelo, y procesamiento agroindustrial, teniendo en cuenta también las características del suelo de la mesa de Guanipa.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Principales propiedades físico mecánicas de la yuca variedades La Reyna y Paigua Negra

Los valores obtenidos para las propiedades que caracterizan fenotípicamente ambas variedades estudiadas se muestran en las Tablas 1 y 2. Las cifras medias de cada una de las propiedades estudiadas reflejan un porte ligeramente superior de la Reyna sobre Paigua Negra, mientras que la productividad de esta última dada por el *Nrp* es ligeramente inferior, 6,6 (Reyna) y 6,06 (Paigua Negra), lo cual desde el punto de vista de la mecanización no establece grandes diferencias en el volumen productivo dado por cantidad de raíces a cosechar y trasladar desde el campo es bastante similar, sin embargo las diferencias en talla y masa como se explica a continuación si denotan un mayor requerimiento energético para la labor de cosecha en La Reyna que en la Paigua Negra.

TABLA 1. Valores medios obtenidos para las propiedades según las variedades estudiadas

VARIEDAD	VALORES MEDIOS DE CADA PROPIEDAD								
	Nrp	Mtp (kg)	Hp (m)	Htr (m)	Hf (m)	Nr	Lrm (m)	Dr (m)	Dcr (m)
PAIGUA NEGRA	6,06	5,63	1,93	1,28	0,65	2,6	0,36	0,042	0,55
LA REYNA	6,6	11,28	2,42	1,88	0,53	2,8	0,61	0,060	0,92

Los resultados obtenidos en cuanto a la **masa total de la planta (Mtp)**, de 11,28 y 5,63 Kg y **longitud de la raíz mayor (Lrm)** de 0,61 y 0,36 m para las variedades la Reyna (dulce) y paigua (amarga), respectivamente, confirman una productividad de más del 50% de la primera sobre la segunda; un elemento significativo a tener en cuenta para garantizar la fuerza de trabajo y los medios de transporte necesarios para mover el producto cosechado desde el campo hasta los puntos de beneficio o comercialización.

La variedad dulce supera a la amarga en cuanto **altura total de la planta, (Hp)**, denotándose en los valores de la media estadística de cada una: 2,42 y 1,93 m. lo que coincide además con los datos obtenidos en investigaciones sobre evaluación y selección de clones de yuca en diferentes ambientes en el Estado Anzoátegui (Fuenmayor *et al.*, 2012), determinándose que la variedad La Reyna, resultó dentro de catorce variedades seleccionada por su altos rendimientos en los tres ambientes evaluados. Desde el punto de vista de las labores culturales, La Reyna presenta ventajas con respecto a Paigua Negra, pues en las labores se prefieren genotipos con altura de plantas y ramificación de intermedia a altos ².

En cuanto a la **altura del tronco, (Htr)**, los valores de La

Reyna (1,88 m) y Paigua Negra (1,28 m), muestran una diferencia porcentual del 60% entre las dos; clasificándose la primera de acuerdo al porte como intermedio: 1,5-2,5 m; y Paigua Negra porte bajo (hasta 1,5 m) ². La Reyna, representa la mayor productora de semilla asexual por su mayor longitud, proporciona más cantidad de semilla/ha y posee características idóneas para la forma de siembra horizontal. A efectos del diseño, ajuste o graduación de los implementos de corte es esencial contar con estos valores estimados de ambas variedades.

Al analizar la **altura del follaje (Hf)**, ver Tabla 3 la Paigua Negra con 0,65m es superior en 10% a La Reyna, 0,53m, lo cual favorece lo planteado por Suárez y Mederos (2011), cuando estimó que se deben seleccionar plantas con mayor cobertura y área foliar, debido al uso para el consumo animal, humano e industrial. Este factor como elemento negativo interfiere directamente con el control de malezas y en labores de atención cultural. En cuanto al **número de ramas (Nr)** no se observan marcadas diferencias en los dos tipos; ambos valores 2,8 y 2,6 reflejan que estos cultivares no presentan variabilidad en su arquitectura foliar, característica importante en el empleo de

⁷ DURÁN, A. Un implemento para cosechar yuca. Inst. CIAT, Colombia, 1979.

equipos con características técnicas similares de aspersión y escarda en los dos casos.

La **longitud máxima de raíz (Lrm)** en los cultivares estudiados indica que la dulce supera a la amarga en un 50 por ciento, con cifras de 0,61m y 0,36m en ambos casos, esta cualidad resulta favorable en la dulce al poseer mayor capacidad de almacenamiento de almidones, lo que garantiza una mayor producción de materia prima con respecto a la amarga. Así mismo, la cosechadora o implemento arrancador, en la yuca dulce, debe graduarse a una profundidad de alrededor 20 cm, minimizando los daños mecánicos en este evento. En cuanto al **diámetro medio de las raíces (Dr)**, las cifras medias indican que la dulce se muestra superior a la amarga, en un 30 % (0,061 vs. 0,042m) por ende a mayor longitud y diámetro, el rendimiento del cultivo por planta es superior en la yuca tipo dulce, lo cual no se manifieste de la misma manera ante un análisis de rendimiento por área si se tiene en cuenta como se explico anteriormente que la yuca amarga presenta un marco

de siembra inferior a la dulce. Por tanto, en la variedad La Reyna las especificaciones de diseño para el transporte serán de diferentes capacidades en relación con la amarga.

El **diámetro del conjunto raíz (Dcr)** indica que la yuca dulce abarca de forma subterránea como promedio 0,92 m, mientras la amarga solo 0,55 m, esta variable para la mecanización de la cosecha de cualquier cultivo, especialmente la yuca es de gran importancia, define al ancho que debe abarcar la herramienta de trabajo y los requerimientos de potencia del agregado en cuestión, que obviamente es superior en la primera.

Propiedades Mecánicas

La Tabla 2 muestra los resultados de las pruebas de propiedades mecánicas efectuadas. Se observan que no existe variabilidad importante entre los clones caracterizados en cuanto a los valores medios de densidad, estimándose para los cultivares dulces y amargos valores de: 1,07 y 1,14 g/cm³.

TABLA 2. Propiedades mecánicas de las variedades estudiadas

Variedad	ρ (g/cm ³)	F (Mpa)	Rr (Mpa)	Rrc (Mpa)	μ	Re kN
La Reyna	1,07	0,25	0,90	5,71	0,41	0,83
Paigua N	1,14	0,29	0,63	3,96	0,39	0,34

El **coeficiente de fricción** obtenido para la yuca sin corteza en contacto con el acero, arrojó datos similares, de 0,41 y 0,39 entre una y otra variedad encontrándose valores de productos agrícolas que oscilan entre 0,30 hasta 0,65, de acuerdo a diferentes superficies de rozamiento, como se reporta en el trabajo de Osorio y Aristizábal (2009), esto indica que durante el diseño de máquinas puede ser empleado el mismo criterio como supuesto de que la tecnología puede trabajar con ambas variedades satisfactoriamente, ello está en correspondencia con lo investigado por Álvarez (2014). En sentido general los datos de las propiedades físico-mecánicas determinan la tecnología de cosecha, transporte, embalaje y almacenamiento.

Los resultados muestran que la resistencia promedio a la **penetración de la corteza**, fue mayor en la dulce de (5,71 MPa) que en la amarga (3,96 MPa), mostrando así que la primera supera a la segunda en 30 %, por tanto ante labores mecanizadas La Reyna tiene mayores posibilidades de no sufrir daños mecánicos, sin embargo una máquina peladora demandará mayores requerimientos energéticos para esta variedad que para la Paigua Negra ya que la supera en talla, proporción en peso de la corteza, diámetro, fuerza de penetración y el estrés de cizallamiento de su corteza, en relación con lo evaluado por Ademosun *et al.* (2012).

Al analizar la **firmeza (F)** por variedades, al comprimir el 3% de la longitud de la probeta la Paigua con (0,29 MPa) supera a La Reyna (0,25 MPa) en 13,8 % mientras que en la **resistencia a la rotura (Rr)**, se invierte el comportamiento y esta última alcanza valores de 0,90 MPa, mientras que la primera solo alcanza 0,63. En dicho comportamiento, a pesar de que ambas

raíces presentan un tejido ligeramente fibroso, muestra que la yuca amarga responde como una estructura más frágil, lo que a su vez propicia que sea menos resistente a golpes y al corte. Estos resultados influyen en la manipulación del producto y en su respuesta en relación con los daños mecánicos, como expresa Mohsenin (1970), acerca de materiales biológicos cuando están bajo el efecto de cargas estáticas y dinámicas.

La **resistencia a la extracción (Re)** desde el suelo, necesaria en la variedad La Reyna (0,83 kN) supera en 59,03 % a la de la Paigua Negra (0,34 kN). Existen varios factores que inciden en este resultado, pero partiendo de que el suelo es similar, tipo Oxisol, que una parcela está a 20 m de la otra, entonces se le atribuye el mismo a la diferencia en el diámetro del conjunto raíz y su masa, el número de raíces y la talla de esta. Esta propiedad define los requerimientos de potencia del agregado o de la máquina encargada de la cosecha, el costo de la tecnología y otros aspectos más específicos que dependen de ellos como es consumo de combustible, etc.

Propuesta de tecnología de cultivo y procesamiento de la yuca según las propiedades físico mecánicas de las variedades estudiadas

La yuca se siembra mediante semilla agámica en forma de estacas, con una amplia tendencia al empleo de tecnologías que se basan en principios de funcionamiento semi mecanizado incluso cuando se siembran en grandes extensiones. La **sembradora** de yuca debe responder a los parámetros físicos de los cultivares estudiados, adecuada a los requerimientos agro técnicos del cultivo; tomando en cuenta la profundidad de

siembra, posición del cangre y tipo de suelo. Cuando éstos son arenosos, como son los referidos en esta investigación se planta la yuca en plano y se recomienda sembrar la estaca vertical a 5 cm de profundidad, para ambas variedades, aún cuando las investigaciones realizadas sugieren que la profundidad no debe pasar de 10-15 cm y debe tener de 3 a 5 nudos, lo que depende de sus características fenotípicas. El espaciamiento recomendado es de 1 x 1 m, el método más empleado a tal efecto es la siembra semimecanizada.

En este caso teniendo en cuenta el marco de siembra recomendado por varios autores y el desarrollo radicular que alcanzan las variedades estudiadas, el cual no sobrepasa los 0,92 m, se pueden emplear máquinas con la capacidad de abarcar 2 o 3 hileras simultáneamente espaciadas cada una de ellas a 1 m, como se muestra en la Figura 3. No obstante, para la variedad Paigua Negra se recomienda emplear un marco de siembra inferior entre 0,8 y 0,9 m, con el objetivo de incrementar el rendimiento por hectárea.



FIGURA 3. Prototipos de máquinas para la siembra de yuca⁸.

Teniendo en cuenta las propiedades físico-mecánicas de las variedades estudiadas, las características del suelo, la metodología de cosecha, condiciones agro técnicas del cultivo y sus restricciones se propone para la labor de **cosecha**: máquinas cuyo diseño se adecúe a una profundidad de trabajo aproximada de hasta 0.20 m, tomando en cuenta el diámetro del conjunto raíz que es inferior a 0,9 en ambas variedades, la longitud máxima de raíz de 0,31 y 0,61 m para la variedad amarga y dulce respectivamente, con una ancho de trabajo que sea capaz de aflojar dos surcos a la vez, superior a 2 m respetando la densidad de siembra de ambas variedades.

La velocidad del equipo debe ser constante, cuyo promedio está en 4 km/h, acoplado a una fuente energética capaz de vencer una resistencia máxima por surco de 0,857 kN. Con este fin existen máquinas autopropulsadas, semi integrales e integrales (Figura 4).



FIGURA 4. Prototipos de aperos para la cosecha de yuca con órganos de trabajo en forma de saeta y rejas⁸.

En cuanto al **descortezado o pelado**, la máquina debe tener como principio de funcionamiento la fuerza de rozamiento entre la corteza de la yuca y las cuchillas de metal, que penetran la cáscara, el diámetro de las variedades determina la capacidad del tambor, para la variedad dulce aproximadamente de 60-70 cm, y para la amarga 45-50 cm (Figura 5). La resistencia superficial al corte se ajusta a los parámetros

obtenidos en las pruebas de penetración realizadas en las dos variedades dulce (5,71 MPa) y amarga (3,96 MPa). La estructura mecánica puede estar acoplada a la toma fuerza del tractor o tener como fuente energética un motor eléctrico o de combustión interna con una velocidad de trabajo que oscile entre 70 - 90 r.p.m, (Figura 5).

⁸ ALIBABA: "Manufacturers, Suppliers, Exporters & Importers from the world's largest online B2B marketplace", [en línea], En: Alibaba.com, Disponible en: <https://www.alibaba.com/>, [Consulta: 28 de febrero de 2017].



FIGURA 5. Prototipos de máquina para el pelado o descortezado de yuca⁸.

Los molinos o maquina rayadora, están sujeta a las propiedades de resistencia a la compresión, cuyos valores estimados para ambos cultivares son: 0,25 y 0,29 MPa, y resistencia a la rotura de 0,90 y 0,63 MPa para la yuca dulce y amarga, respectivamente. También a los valores de resistencia a la ruptura, que son superiores en la variedad La Reyna que en la Paigua Negra, esta última demostrando un comportamiento más frágil como respuesta a cargas estáticas. El proceso de rayado debe realizarse sobrepasando las 700 rpm para lograr un desmenuzado adecuado (Figura 6).



FIGURA 6. Prototipos de máquina para el rayado o molinado de yuca⁸.

CONCLUSIONES

- La variedad Paigua Negra posee propiedades ligeramente superiores sobre la variedad La Reyna para la mecanización y/o procesamiento de su cultivo con un menor el peso total de la planta, diámetro del conjunto raíz y resistencia a la extracción desde el suelo, sin embargo La Reyna posee mayor resistencia a la compresión y a la ruptura de la corteza con valores superiores en un 30%.
- La valores medios de las propiedades estudiadas para cada variedad muestra una masa total de la planta (Mtp) de 11,28 y 5,63 kg; altura de la planta, (Htp) de 2,42 y 1,93 m; altura del conjunto tallo – raíz (Htr) de 1,9 y 1,3 m; altura del follaje (Hf) de 0,53 m y 0,65 m; número de ramas por planta (Nrp) de 2,8 por 2,6; diámetro del tallo principal de 0,022 a 0,024 m; longitud de la raíz máxima (Lrm) de 0,061 y 0,036 m; el diámetro promedio de las raíces de 0,060 y 0,043 m y diámetro del conjunto raíz (Dcr) de 0,918 y 0,545

m, para las variedades La Reyna y Paigua Negra, respectivamente.

- Las propiedades físico mecánicas alcanzan valores tales como μ de 0,41 y 0,39, la resistencia a la penetración de la corteza (Rrc), de 5,71 y 3,96 MPa, la firmeza (F) de 0,25 y 0,29 MP, la resistencia a la rotura (Rr) de 0,90 y 0,63 MPa y la resistencia a la extracción (Re) desde el suelo de 0,83 kN y 0,34 kN para las variedades La Reyna y Paigua Negra, respectivamente.
- Se propone una tecnología compuesta por: máquina sembradora de 2 o 3 hileras simultáneamente, espaciadas a 1 m como máximo; máquina de cosecha que abarque doble surco, con profundidad hasta 0,20 m, ancho de trabajo de 2 m y capaz de vencer una resistencia de extracción por surco de 0,857 kN; máquina peladora capaz de vencer resistencia de 5,71 Mpa con 70-90 rpm de frecuencia de rotación y molino que desarrollen 750 rpm o superior y que venzan resistencia a la compresión de 0,29 MPa y a la de 0,90 MPa para la yuca dulce y amarga, respectivamente.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADEMOSUN, O.C.; JIMOH, M.O.; OLUKUNLE, O.J.: "Effect of physical and mechanical properties of cassava tubers on the performance of an automated peeling machine", *International Journal of Development and Sustainability*, 1(3): 810–822, 2012, ISSN: 2168-8662.

- ADETAN, D.A.; ADEKOYA, L.O.; ALUKO, O.B.: "Characterisation of some properties of cassava root tubers", *Journal of Food Engineering*, 59(4): 349-353, 2003, ISSN: 0260-8774, DOI: 10.1016/S0260-8774(02)00493-4.
- ALARCÓN, F.; DUFOUR, D.: *Almidón agro de yuca en Colombia*, [en línea], Ed. CIAT, Colombia, no. 268, 1998, ISBN: 958-9439-67-5, Disponible en: <http://www.clayuca.org/sitio/index.php/component/k2/item/28-almid%C3%B3n-agro-de-yuca-en-colombia>, [Consulta: 21 de febrero de 2016].
- ÁLVAREZ, L.C.: "Determinación del punto isoeléctrico de las proteínas presentes en cuatro fuentes foliares: yuca (*Manihot esculenta* Crantz) variedades verónica y tai, jatropha (*Jatropha curcas* L.) y gmelina (*Gmelina arborea*)", *Prospectiva*, 12(1): 30, 2014, ISSN: 2216-1368, 1692-8261, DOI: 10.15665/rp.v12i1.148.
- BUITRAGO, G.V.; LÓPEZ, A.P.; CORONADO, A.P.; OSORNO, F.L.: "Determination of physical characteristics and mechanical properties of potatoes cultivated in Columbia", *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 8(1): 102-110, 2004, ISSN: 1415-4366, DOI: 10.1590/S1415-43662004000100015.
- ENGELS, J.: *Catálogo de la colección de yuca (Manihot esculenta Crantz)*, ser. Boletín Técnico, no. ser. 2, Ed. CATIE, Turrialba, 40 p., 1981.
- FAMA, L.; FLORES, S.; GERSCHENSON, L.; GOYANES, S.: "Physical characterization of cassava starch biofilms with special reference to dynamic mechanical properties at low temperatures", *Carbohydrate Polymers*, 66(1): 8-15, 2006, ISSN: 0144-8617, DOI: 10.1016/j.carbpol.2006.02.016.
- FAO: "Anuario Estadístico de la FAO", [en línea], En: *FAOSTAT*, FAO Statistics Division, 2010, Disponible en: <http://faostat.fao.org/site/339/default.aspx>, [Consulta: 10 de abril de 2015].
- FUENMAYOR, C.F.C.; MONTILLA, J.; ALBARRÁN, J.G.; PÉREZ, M.; VACCARINO, A.L.C.; SEGOVIA, S.V.F.: "Evaluation and selection of cassava (*Manihot esculenta* Crantz) clones from National Seed Plan of INIA-Venezuela. Preliminary results", *Revista Científica UDO Agrícola*, 12(1): 17-24, 2012, ISSN: 1317-9152.
- HALLÉ, F.; OLDEMAN, R.A.A.; TOMLINSON, P.B.: *Tropical Trees and Forests*, [en línea], Ed. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 444 p., 1978, ISBN: 978-3-642-81192-0, Disponible en: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-642-81190-6>, [Consulta: 27 de febrero de 2016].
- HENRY, G.; WESTBY, A.; COLLINSON, C.: *Global cassava end-uses and markets: current situation and recommendations for further study*, [en línea], no. Report of a FAO consultancy by the European Group on Root, Tuber & Plantain, Inst. FAO-ESCB, Roma, Italia, 58 p., 1998, Disponible en: http://www.hubrural.org/IMG/pdf/global_cassava_end_use_study.pdf, [Consulta: 21 de febrero de 2016].
- MELO, C.O.A.; VARGAS, R.R.: *Evaluación ecológica y silvicultural de ecosistemas boscosos*, [en línea], Ed. Universidad del Tolima, 1.^a ed., 235 p., 2002, ISBN: 956-9243-03-07, Disponible en: <https://www.yumpu.com/es/document/view/14197807/evaluacion-ecologica-y-silvicultural-de-ecosistemas-boscosos>, [Consulta: 27 de febrero de 2016].
- MOHSENIN, N.N.: *Structure, physical characteristics and mechanical properties*, ser. Physical properties of plant and animal materials, no. ser. 1, Ed. Gordon and Breach, New York, USA, 734 p., 1970.
- MOJENA, M.; BERTOLÍ, M.P.: "Rendimiento en la yuca (*Manihot esculenta*) en diferentes arreglos espaciales", *Agronomía Costarricense*, 28(2): 87-94, 2004, ISSN: 0377-9424.
- OSORIO, S.; ARISTIZÁBAL, J.: "Influencia de la variedad de yuca y nivel de sustitución de harinas compuestas sobre el comportamiento reológico en panificación", *Ingeniería e Investigación*, 29(1): 39-46, 2009, ISSN: 2248-8723, 0120-5609.
- OSPINA, B.; CEBALLOS, H.: *La Yuca en el Tercer Milenio: Sistemas Modernos de Producción, Procesamiento, Utilización y Comercialización*, [en línea], Ed. CIAT, Cali, Colombia, 587 p., Google-Books-ID: I18Dz9sYZO8C, 2002, ISBN: 978-958-694-043-6, Disponible en: <https://books.google.com/cu/books?id=I18Dz9sYZO8C>, [Consulta: 21 de marzo de 2016].
- PETROCELLI, E.: *Propiedades físico-mecánicas de la yuca (Manihot esculenta L. Crantz) variedades La Reyna y Paigua Negra en el estado Anzoátegui, Venezuela*, Universidad Politécnica Territorial «José Antonio Anzoátegui», Tesis de Maestría, Anzoátegui, Venezuela, 2015.
- STATISTICAL GRAPHICS CROP: *STATGRAPHICS® Plus*, [en línea], (Versión 5.1), [Windows], ser. Profesional, 2000, Disponible en: <http://www.statgraphics.com/statgraphics/statgraphics.nsf/pd/pdpricing>.
- SUÁREZ, L.; MEDEROS, V.: "Apuntes sobre el cultivo de la yuca (*Manihot esculenta* Crantz). Tendencias actuales", *Cultivos Tropicales*, 32(3): 27-35, 2011, ISSN: 0258-5936.
- YIRAT, B.M.; GARCÍA, P.A.; HERNÁNDEZ, G.A.; CALDERÍN, G.A.; CAMACHO, A.N.: "Evaluación de la calidad de la guayaba, variedad enana roja EEA-1-23, durante el almacenamiento a temperatura ambiente", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 18(2): 70-73, 2009, ISSN: 1010-2760, 2071-0054.

Recibido: 22/07/2016.

Aprobado: 28/02/2017.

Annia García-Pereira, Profesora Titular, Universidad Agraria de La Habana (UNAH), Facultad de Ciencias Técnicas, Autopista Nacional km 231/2 y carretera de Tapaste, San José de las Lajas, Mayabeque, Cuba. Correo electrónico: annia@unah.edu.cu

Ellys Petrocelli, Correo electrónico: ellyspetrocelli@gmail.com

Jorge García-Coronado, Correo electrónico: jgarcia@unah.edu.cu

Yolanda Sabin-Rendón, Correo electrónico: yolanda@unah.edu.cu

Antihus Hernández-Gómez, Correo electrónico: antihus@unah.edu.cu

Nota: 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.