

Determinación de algunas propiedades físicas de *Agave tequilana* Weber para mecanizar la cosecha*

Determination of some physical properties of *Agave tequilana* Weber for mechanizing crop

Alberto Saldaña Robles¹, Ryszard Jerzy Serwatowski Hlawinska¹, Noé Saldaña Robles¹, César Gutiérrez Vaca^{1§}, José Manuel Cabrera Sixto¹ y Salvador García Barrón¹

¹Departamento de Ingeniería Agrícola. Universidad de Guanajuato. Campus Irapuato-Salamanca. Ex-Hacienda "El Copal". Carretera Irapuato-Silao, km 9. Irapuato, Guanajuato, México. C. P. 36820. Tel. 52 462 6245215. (a.saldana.robles@ugto.mx), (ryszard@ugto.mx), (saldanar@ugto.mx), (cesarg@ugto.mx), (jmcabrera@ugto.mx), (salvagb@ugto.mx). [§]Autor para correspondencia: cesarg@ugto.mx.

Resumen

En el estudio realizado se determinaron algunas propiedades físicas (dimensiones y pesos) de la planta de *Agave tequilana* Weber y de sus elementos por separado (piña, hojas y raíz) empleando instrumentos básicos de medición, así como también se cuantificó la energía unitaria requerida para el corte de las hojas. Estos parámetros se emplearán en el diseño de una cosechadora-troceadora de agave. El estudio se realizó en noviembre de 2010 en la comunidad "El Copal", municipio de Irapuato, Guanajuato, México. Para cuantificar la energía unitaria se evaluaron dos parámetros. El primer parámetro fue la energía que requiere el corte de la hoja de agave, dicha energía se evaluó en 10 posiciones a lo largo de una hoja de aproximadamente 1 m, realizando 4 repeticiones. Para esto se empleó un dispositivo que aplica caída libre. El segundo parámetro fue el área de la sección transversal, en las mismas posiciones de hoja donde se determinó la energía de corte, para lo cual se empleó visión artificial. De esta información se calculó la energía unitaria, resultando un valor promedio de $2.50 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-2}$. Las propiedades físicas evaluadas presentan una gran variabilidad. La media de los resultados obtenidos concuerda con lo obtenido por otros autores(as). Se encontró que existe una relación bien definida entre: energía de corte, área de la sección transversal

Abstract

In this study some physical properties (dimensions and weights) of *Agave tequilana* Weber plant were determined and of their individual elements (pineapple, leaves and root) using basic measuring devices, as well it was measured unitary energy required for leaves cut. These parameters would be used in the design of agave's harvester-shredder. The study was made at "El Copal", municipality of Irapuato, Guanajuato, Mexico. To quantify unitary energy two parameters were assessed. The first parameter was energy used during agave leaf cut this energy was assessed in 10 positions along 1m length leaf, making four repetitions. A device which applies free falling was used. The second parameter was transversal section area, in the same positions were cut energy where made in leaf, using artificial vision. From this information unitary energy was calculated, giving as result an average of $2.5 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-2}$. The physical properties assessed have high variability. Mean of these results coincides with the values obtained by other authors. It was found that there is well defined relation between: cut energy, leaf transversal section area and position along leaf, in the extent that one of the variables increases the other increases according to second order polynomial.

* Recibido: junio de 2011
Aceptado: febrero de 2012

de la hoja y la posición de la sección a lo largo de la hoja, a medida que una de las variables aumenta la otra incrementa de acuerdo a un polinomio de segundo orden.

Palabras clave: *Agave tequilana* Weber, cosechadora, energía unitaria, maquinaria agrícola,

Introducción

El principal uso del *Agave tequilana* Weber hoy en día es la producción de tequila que se obtiene a partir de la piña. Sin embargo, existen estudios de investigación que demuestran la factibilidad de obtener bioetanol a partir de las hojas inclusive (González, 2008; Cáceres *et al.*, 2009; Madrigal, 2009). González (2008) manifiesta que la producción de bioetanol es viable en lo biológico, a partir de las hojas y piña de la planta, alcanzando valores de hasta 7 000 l/ha/año superior a lo obtenido para caña de azúcar y maíz, además que estos últimos son considerados fuente alimenticia. La producción de bioetanol cobra importancia pues se está en la búsqueda de nuevas fuentes de energía y donde el Agave parece ser una opción prometedora que supondría beneficios económicos importantes (Sierra, 2011; Davis, *et al.*, 2011).

Holtum *et al.* (2011) y Núñez *et al.*, (2011) recomiendan que para abatir los costos de producción es necesario mecanizar el sistema de cosecha, entre otras ideas, pues es el segundo costo más importante a lo largo de los siete años, en promedio, que tarda en madurar la planta. El diseño de una cosechadora requiere de conocimiento de las propiedades físicas de la planta cosechada, como tamaño y peso, densidad de población, fuerzas y velocidades necesarias para realizar satisfactoriamente las operaciones como corte, extracción, separación, desmenuzado; con lo anterior se procede a dimensionar la máquina y sus órganos de trabajo propuestos, así como estimar la potencia requerida para su accionamiento.

Existen estudios publicados sobre las propiedades físicas para gran variedad de productos agrícolas (Irtwange e Igbeka, 2002; Luther *et al.*, 2004; Isik, 2007), como en el caso del agave variedad *Sisal* donde se determinaron las dimensiones de la hoja, la piña y la energía de corte que eran requeridas para la mecanización de la cosecha del cultivo (Majaja y Chancellor, 1997). Sin embargo, existen otras variedades de agave en los que algunas de las propiedades físicas no han sido determinadas. En el presente trabajo se determinan las dimensiones de las hojas y piña de la planta

Key words: *Agave tequilana* Weber, harvester, unitary energy, agricultural machinery.

Introduction

Main use of *Agave tequilana* Weber nowadays is tequila production obtained from pineapple. However, there are research studies showing the feasibility to obtain bioethanol even from leaves (González, 2008; Cáceres *et al.*, 2009; Madrigal, 2009). González (2008) states that bioethanol production from plant's leaves and pineapple is biologically viable, reaching values of up to 7 000 l/ha per year above to yield obtained from sugar cane and maize, also these last are considered food crops. Bioethanol production is key since now there is a quest for new energy sources and Agave is a promising option that would represent important economical benefits (Davis, *et al.*, 2011; Sierra, 2011).

Holtum *et al.* (2011) and Núñez *et al.* (2011) recommend that for reducing production costs is required to mechanize harvest system, among other ideas, since is the second contributor cost during 7 years, in average, that plant reaches its maturity. Harvester design involves knowledge about physical properties of harvested plant, like size and weight, plants density, forces and speeds needed for efficiently performing operations such as cutting, extraction, separation, shredding; with this information then is possible to size machine and their proposed working components, as well to calculate power required for driving it.

There are published studies about physical properties of many agricultural products (Irtwange and Igbeka, 2002; Luther *et al.*, 2004; Isik, 2007), as in case of agave cultivar *Sisal* where dimensions for, leaf, pineapple and energy cut required for this crop's harvest mechanization were determined (Majaja and Chancellor, 1997). However, there are other agave cultivars in which some physical properties have not been determined. In this work the dimensions of leaves and pineapple of *Agave tequilana* Weber plant are determined; and also leaves, pineapple and root weights. Also the unitary energy for leaf cut is determined and its relationships between cut and position along leaf and with transversal section area. Such parameters will be used with the aim to design an agave harvester-shredder prototype machine.

de *Agave tequilana* Weber; y los pesos de hojas, piña y raíz. Se determina además la energía unitaria para el corte de hoja y sus posibles relaciones con la posición de la sección a lo largo de la hoja y con el área de la sección transversal. Dichos parámetros serán utilizados en el diseño de un prototipo de cosechadora -troceadora de agave.

Materiales y métodos

Para la realización del presente estudio se emplearon nueve plantas de *Agave tequilana* Weber de entre 7 y 8 años de edad. Tres fueron extraídas del campo experimental de agave de la División de Ciencias de la Vida (DICIVA) de la Universidad de Guanajuato, las otras seis plantas fueron proporcionadas de las plantaciones de la empresa tequilera Real de Pénjamo S. A. de C. V. Los nueve agaves fueron transportados a las instalaciones de la DICIVA en el municipio de Irapuato, los primeros tres fueron trasladados con piña, hojas y raíz (Figura 1 a) y de los otros seis se trasladó únicamente la piña (Figura 1 b).

Materials and methods

During its development this study used nine *Agave tequilana* Weber plants between 7 and 8 years old. Three were supplied by agave experimental field from División de Ciencias de la Vida (DICIVA) of Universidad de Guanajuato, the other six plants were supplied from plantations of tequila company Real de Pénjamo S. A. de C. V. Nine agaves were moved to DICIVA facilities at municipality of Irapuato, the first three were complete with pineapple, leaves and root (Figure 1 a) and the other six only the pineapple (Figure 1 b).

Determination of dimensions and weights in complete plant. Before *jimar* (remove leaves to keep pineapple) the three plants the following physical characteristics were determined: plant height without root, root length, maximum diameter taking into account the longest leaves, plant weight without root and root weight. 5m \pm 0.5 mm measuring tape was used to measure height, plant diameter,

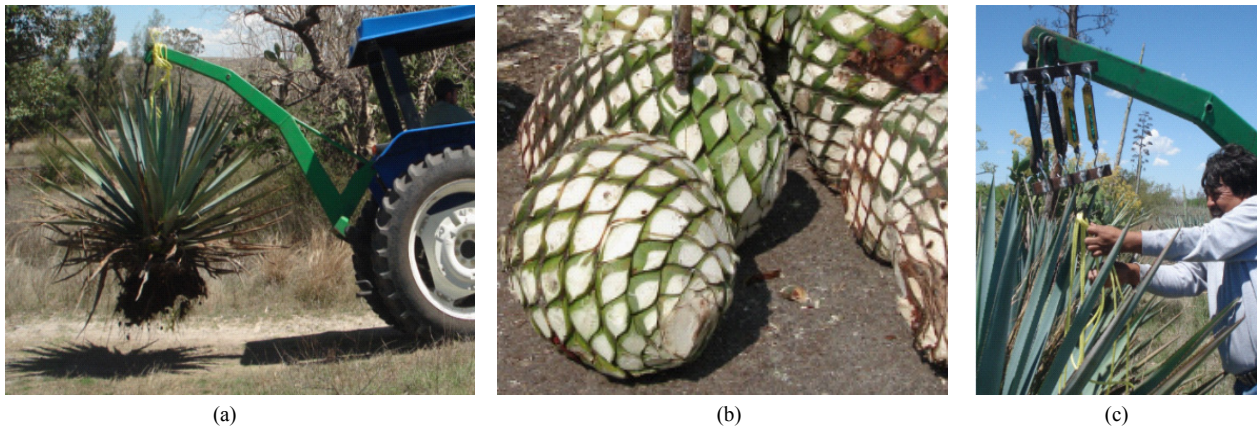


Figura 1. Materia prima y equipo agrícola para ensayos; (a) planta completa de la DICIVA; (b) piñas de tequilera “Real de Pénjamo”; y (c) báscula de dinamómetros montada sobre pluma agrícola.

Figure 1. Raw material and agricultural equipment for tests; (a) complete plant from DICIVA; (b) pineapples from tequila company “Real de Pénjamo”; and (c) dynamometers mounted on agricultural mower.

Determinación de dimensiones y pesos de la planta completa. Antes de *jimar* las tres plantas se determinaron las siguientes propiedades físicas: altura de la planta sin raíz, longitud de la raíz, diámetro máximo tomando en cuenta las hojas más extendidas, peso de planta sin raíz y peso de la raíz. El instrumento de medición empleado para obtener la altura, el diámetro de la planta, así como la profundidad de la raíz fue un flexómetro de 5 m \pm 0.5 mm. La lectura se realizó colocando la planta en una superficie horizontal

and root depth. The measuring was made placing plant horizontally and with an element in its upper portion, and its horizontality was verified making measurement of each extreme of element that was the same. Each plant was measured using the same process. To obtain weight of all plant and root a specially made weighing scale was used, which consisted of an array in parallel four 50 kgf \pm 0.5 kg dynamometers (Figure 1 c), the bascule was put in agricultural mower coupled and driven by

y con un elemento en la parte superior de la planta, cuya horizontalidad se verificó realizando la medición de cada extremo del elemento para que fuese la misma. Se siguió el mismo proceso para cada una de las plantas. Para obtener el peso de la planta completa y la raíz se empleó una báscula fabricada especialmente para esta aplicación que fue un arreglo en paralelo de cuatro dinamómetros de 50 kgf \pm 0.5 kg cada uno (Figura 1 c), la báscula se colocó en una pluma agrícola acoplada y accionada por un tractor New Holland 5610S de potencia mediana (78 hp). El dispositivo con los dinamómetros se colocó en el gancho de la pluma agrícola, y la planta de agave se sujetó de su base mediante una cuerda que posteriormente se colocó en el dispositivo con los dinamómetros

Determinación de dimensiones y peso de la piña. Se jimaron las plantas separando las hojas y piñas. Las propiedades físicas que se determinaron para cada piña en las nueve plantas, fueron el peso, la altura y el diámetro máximo, para lo cual se emplearon los mismos instrumentos de medición y procedimiento que en la planta completa.

Determinación de dimensiones y peso de la hoja. Las propiedades a determinar en las hojas fueron: número de hojas por planta, longitud, el ancho máximo, espesor máximo y peso. Para determinar longitud, ancho y espesor se empleó el flexómetro antes mencionado. Para determinar los pesos de cada hoja se empleó una balanza analítica Scout™ Pro con precisión de \pm 1 g. Los parámetros anteriormente mencionados se determinaron en 30 hojas seleccionadas al azar de tres plantas, un total de 90 hojas. Una vez obtenidas las mediciones para las distintas propiedades de la planta así como de cada uno de sus elementos (hojas y piña) se obtuvo el valor medio y la desviación estándar.

Estimación de la energía de corte por sección (relación posición-energía). Se diseñó y construyó un dispositivo (Figura 2 a) para evaluar la energía de corte. Dicho elemento está formado de un par de marcos en “U” invertida que están soldados en una placa de metal, ambos marcos tienen en su parte media superior un tubo soldado de 6 cm de largo y 0.5 plg de diámetro nominal, el cual sirve como guía. En el primer marco la guía permite el movimiento de una varilla lisa que en un extremo cuenta con una base rectangular y en el otro tiene una cuchilla tipo “Y” (Figura 2 b), la cual realiza el corte de la hoja de agave. Similar a la del prototipo que se pretende diseñar, el tipo de cuchilla, es la más empleada en máquinas agrícolas (trituradoras, desmenuzadoras, molinos, etc.).

New Holland 5610S tractor of intermediate power (78 hp). The device with dynamometers was put in the agricultural mower hook and agave plant was held from its base by rope and this was used to put it in the dynamometers device.

Determination of pineapple dimensions and weight. Plant was divided in leaves and pineapples. The physical properties that were determined for each pineapple in the nine plants were weight, height and maximum diameter, for which the same measuring instruments and procedure for complete plant were used.

Determination of leaves dimensions and weight. The properties to assess in leaves were: number of leaves per plant, length, maximum width, maximum thickness and weight. To determine length, width and thickness the previously mentioned measuring tape was used. To determine the weights of each leaf a Scout™ Pro analytical balance with \pm 1 g precision was used. These parameters were taken from 30 leaves randomly selected from three plants, giving a total of 90 leaves. Once measurements for different plant properties as well as each of its components (leaves and pineapple) were taken as well as mean value and standard deviation.

Estimation of energy per section cut (relationship position-energy). A device was designed and built (Figure 2 a) to assess cut energy. Such element is comprised by two inverted “U” frames welded to metallic plate, both frames have in the middle of upper section one welded 6 cm length and 0.5 inches diameter tube as guide. In the first frame the guide allows motion of a blade with rectangular shape in one end and Y type blade in the other end (Figure 2 b), which makes leaf cut. Similar to prototype for design, knife type is the most used in agricultural machines (crushers, shredder, mills, etc.).

The blade was supplied with smooth edge and 30° angle of attack and was made from 1.5 in x 0.25 in ASTM-A36 commercial beam, recommended values that require less force to make cut in agave plant (Sierra *et al.*, 2010) assuring resistance and sharp rigidity of knife. In the second frame (which is approximately 4 times taller than first one) the tube serves like guide for weight holder. In the metallic plate were blade rests wood base was put to mitigate loss of sharp effect, by impact of blade on metal. The aim of device is to transform potential energy into kinetic by free fall, to make leaf cut by blade.

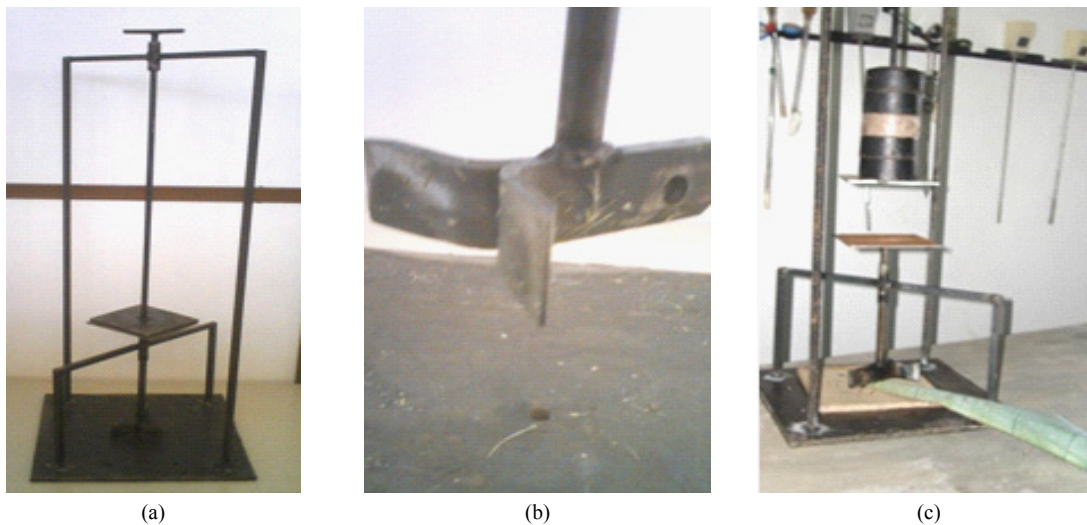


Figura 2. Dispositivo de prueba (a) vista general; (b) detalle cuchilla tipo “Y”; y (c) ensayo a 0.1 m.
Figure 2. Test device: (a) general overview; (b) “Y” type blade detail; and (c) test at 0.1 m.

La cuchilla se provió de un borde liso con un ángulo de ataque de 30° y se fabricó de solera comercial ASTM-A36 de 1.5 plg. X 0.25 plg., valores recomendados que precisan la menor fuerza para realizar el corte de la planta de agave (Sierra *et al.*, 2010) asegurando resistencia y rigidez del filo de la navaja. En el segundo marco (que es aproximadamente 4 veces más alto que el primero) el tubo sirve de guía a un porta-pesas. En la placa de metal donde se apoya la cuchilla se colocó una base de madera para mitigar el efecto de la pérdida de filo, por el impacto de la cuchilla sobre la base de metal. El objetivo del dispositivo es transferir energía potencial a cinética empleando caída libre, para realizar el corte de la hoja con la cuchilla.

Se preparó el material para las pruebas seleccionando al azar cinco hojas de una planta de agave, las cuales fueron marcadas cada 10 cm comenzando de la espina en la punta de la hoja, con un total de 10 marcas por hoja, la longitud de las hojas en promedio fue de alrededor de un 1 m. Las marcas fueron identificadas como la posición de corte en la hoja, iniciando con la posición cero en la punta de la hoja y terminando en la posición diez cerca del extremo que estaba unido a la piña de agave. Al porta-pesas se le agregaron pesas de 4, 6, 10 y 20 kg en diferentes combinaciones. Para cortar las posiciones de la hoja con menos espesor se emplearon pesos pequeños, a medida que el grosor y ancho de la hoja aumentó se manejaron pesos más grandes. Sobre la base de madera del dispositivo de prueba se colocó una hoja tres centímetros atrás de la primera marca (0.1 m de la punta) apoyando la cuchilla tipo “Y” ligeramente. Una vez logrado el corte completo se repitió en la sección indicada

The material was prepared for tests selecting at random five leaves of agave plant, which were identified each 10 cm starting in the thorn and finishing in leaf tip, with a total of 10 marks per leaf, the average length of leaves was around 1 m. The marks were identified like cut position in leaf, starting in position zero in leaf tip and finishing in position ten near the end that was joint to agave pineapple. The weight holder was prepared with weights of 4, 6, 10 and 12 kg in different combinations. To cut positions in leaf with less thickness small weights were used, as thickness and leaf width increased bigger weights were used. Over wood base of testing device a 3 cm plate was put first mark (0.1m) slightly supporting “Y” type blade. Once achieving full cut it was repeated in the indicated section to determine cut energy, recording mass values of used weights and height of falling of weight holder. Cut energy (E_{CS}) in such section was calculated using the following simplified equation.

$$E_{CS} = m_p g h \quad (1)$$

Where: m_p = is mass of weight holder plus mass of weights (kg); g = gravity force at Irapuati city (m/s^2); and h = height of weight holder (m). To determine gravity value at Irapuato it was used an equation recommended by Organización Internacional de Metrología Legal (OIML) with a precision of 0.01% (Thulin, 1992). This is the equation.

$$g_l = g_e * (1 + f * \sin^2 \theta - (5.8 \times 10^{-6} * \sin^2 2\theta) - 3.086 \times 10^{-6} * H) \quad (2)$$

a determinar la energía de corte, registrando los valores de masa de las pesas empleadas y altura de caída del porta-pesas. La energía de corte en dicha sección (E_{CS}) se calculó empleando la siguiente ecuación simplificada.

$$E_{CS} = m_p gh \quad (1)$$

Donde: m_p es la masa del porta-pesas más masa de pesas (kg); g es la gravedad en la ciudad de Irapuato (m/s^2); y h es la altura de elevación del porta-pesas (m). Para determinar el valor de la gravedad en el municipio de Irapuato se empleó la ecuación recomendada por la Organización Internacional de Metrología Legal (OIML) que presume una precisión de 0.01% (Thulin, 1992). La ecuación se presenta a continuación.

$$g_l = g_e * (1 + f * \text{sen}^2 \phi - (5.8 \times 10^{-6} * \text{sen}^2 2\phi) - 3.086 \times 10^{-6} * H) \quad (2)$$

Dónde: g_l es la aceleración de la gravedad local (m/s^2); g_e es la aceleración de la gravedad a nivel del mar ($9.7803 m/s^2$); f es la constante de aplastamiento gravitacional con un valor de 0.0053024; ϕ es la latitud en grados; y H es la altitud ortométrica sobre el nivel medio del mar.

La ecuación anterior utiliza los coeficientes adoptados por la Asociación Internacional de Geodesia (IAG) en el sistema GRS80 (Geodetic Reference System of 1980), dichos coeficientes representan el tamaño, forma y campos gravitacionales de la tierra (Moritz, 1988). La altitud para el municipio de Irapuato es de 1730 m y la latitud Norte de 20.6° (INEGI, 2010), resultando un valor de aceleración gravitacional de 9.7814 m/s^2 .

Una vez realizada la prueba de corte a 0.1 m desde la espina, (Figura 2c) y habiendo calculado la energía con la ecuación (1), se repitió el mismo procedimiento anterior para las siguientes 9 posiciones sobre la hoja; la misma metodología se efectuó para las otras 4 hojas, calculando un total de 50 energías de corte. Una vez realizadas las pruebas en las cinco hojas se obtuvo el valor medio y la desviación estándar de la energía para cada posición en la hoja. Con los datos medios obtenidos de la energía en cada sección de la hoja se buscó la regresión que ajustase mejor a los datos empleando para ello Microsoft Excel 2010. Se verificaron cuatro modelos estadísticos de regresión: lineal, polinomial de orden dos, exponencial y logarítmica, de ellas se escogió la que mejor predijo el fenómeno en función del máximo coeficiente de Pearson.

Determinación del área transversal de la hoja por posición (relación área-energía, energía unitaria). Se define a la energía unitaria, como la cantidad de energía necesaria para

Where: g_l = local gravity (m/s^2); g_e = acceleration of gravity at sea level ($9.7803 m/s^2$); f = constant of gravitation crushing with a value of 0.0053024; ϕ = latitude in degrees; and H = orthometric altitude over average sea level.

The previous equation use coefficients adopted by Asociación Internacional de Geodesia (IAG) in the system GRS80 (Geodetic Reference System of 1980), such coefficients represent earth's size, shape and gravitational fields (Moritz, 1988). Altitude of municipality of Irapuato is 1730 m and north latitude is 20.6° (INEGI, 2010), giving a value of gravitational acceleration of 9.7814 m/s^2 .

Once the cut test was made at 0.1 m from thorn, (Figure 2 c) and after calculating energy with equation (1), the same procedure was repeated for the following 9 positions on the leaf; the same methodology was used for the other four leaves, calculating a total of 50 cut energies. Once the tests were made in the five leaves mean value and standard deviation was obtained from energy at each leaf position. With the data obtained from energy in each section of leaf, the best regression adjusted to data was found using Microsoft Excell 2010. Four statistical models for regression were verified: lineal, second order polynomial, exponential and logarithmic, from them it was selected the one that best predicted the function of Pearson's maximum coefficient.

Determination of leaf transversal area per position (relationship area-energy, unitary energy). Unitary energy is defined as amount of energy required for leaf cut per unit of transversal area. Cut energy was previously estimated each 0.1 m of leaf along 1m, obtaining 10 estimations, therefore it was suitable to determine transversal area in those same sections. To determine area image digital analysis (IDA) was used. The IDA method consisted in estimate transversal area from digital images taken by Intel CS120 Web Cam configured at 320 x 240 pixels resolution. A computer routine was developed with software MATLAB 8a using IDA library. This routine allows to define area of white / black re-masterized image. The Intel CS120 web cam was mounted in a structure (Figure 3 b) specially built for IDA. This structure counts with several devices that play an important role for proper image analysis. Uniform illumination on sample of transversal area of agave leaf is very important to avoid shadows in transversal area; with this purpose the structure has two Stocker Yale lamps (Figure 3 a) at a height of 45 cm away from the objective (area sample), with inclinations

el corte de la hoja por unidad de área transversal. La energía de corte fue estimada anteriormente cada 0.1 m de la hoja a lo largo de 1m, obteniendo 10 estimaciones, por lo que fue conveniente determinar el área transversal en estas mismas secciones. Para determinar el área se empleó análisis digital de imagen (ADI). El método de ADI consistió en estimar el área de la sección transversal de la hoja de agave cada 0.1 m, a partir de imágenes digitales tomadas por una Cámara Web Intel CS120 (Figura 3 a) configurada para una resolución de 320 x 240 píxeles. En el programa MATLAB 8a se elaboró una rutina empleando la librería de ADI. La rutina elaborada permite determinar el área de una imagen remasterizada en blanco y negro. La Cámara Web Intel CS120 fue montada en una estructura (Figura 3 b) construida especialmente para el ADI. La estructura cuenta con varios aditamentos que juegan un papel importante para el adecuado análisis de las imágenes. La iluminación uniforme sobre una muestra de área transversal de la hoja de agave es de gran importancia para eliminar las sombras del área transversal; para ello la estructura cuenta con un par de Lámparas StockerYale (Figura 3 a) acomodadas a una altura de 45 cm del objetivo (muestra de área), con ángulos de inclinación de 25 grados respecto de la horizontal. A la base donde la cámara toma las imágenes se colocó una hoja de papel color rosa (PANTONE Rhodamine Red) para contrastar el color del área transversal de la hoja de agave (Figura 3 c).

angles of 25 degrees regards horizontal axis. The base where camera takes images a pink colored paper sheet (PANTONE Rhodamine Red) was put to make contrast with agave leaf transversal area color (Figure 3 c).

Intel CS120 web cam takes an image and MATLAB routine process it at gray level with 8 bits resolution (Figure 4 a). Conversion is made averaging digital levels of each RGB color channel also at 8 bits. Then it was used bias factor of 0.7 for obtain processed black and white images (Figure 4 b). Bias factor was found at test and error for supplied illumination, background used and objective color and texture characteristics. With black and white image of transversal area of agave leaf shown by white pixels and the rest of image in black color, the MATLAB routine counted the amount of white pixels and converts them into area using a conversion factor fed to software routine. To obtain conversion factor a calibration is required. For this study the calibration was performed to set conversion factor using software routine, putting 2 white square papers with different area; 1 cm², 9 cm² and 36cm². After calibration, images were taken from agave leaves cuts.

Procedure to determine transversal area at every 10 cm of agave leaf is described in the following lines. Five agave plant leaves were randomly cut, and were marked

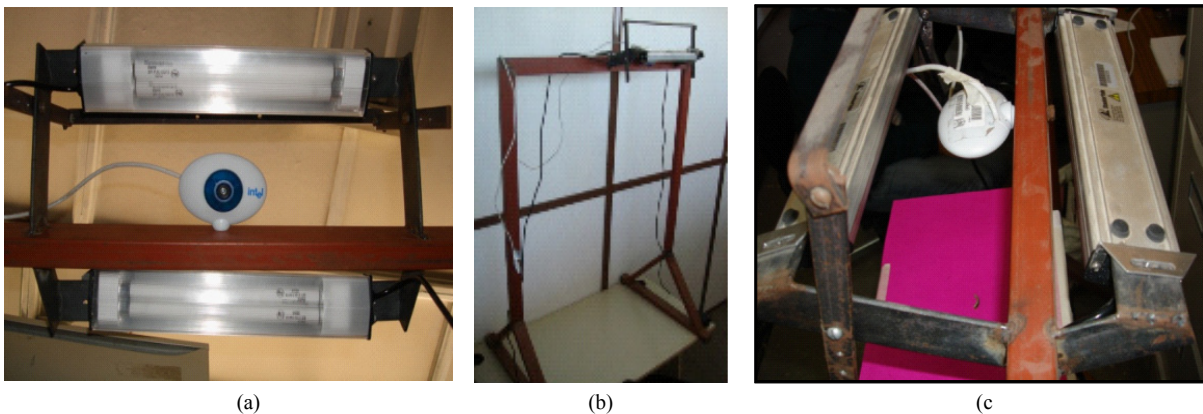


Figura 3. Equipo de visión artificial; (a) cámara Web Intel CS120 y lámparas StockerYale; (b) estructura de soporte; y (c) ensayo de lectura de área a 0.1 m de la hoja 1.

Figure 3. Equipment for artificial vision; (a) Intel CS120 web cam and StockerYale lamps; (b) support structure; and (c) test for measuring area at 0.1m away from leaf 1.

La Cámara Web Intel CS120 toma una imagen y la rutina en MATLAB posteriza a un nivel de grises con una resolución de 8 bits (Figura 4 a). La conversión se realiza promediando los niveles digitales de cada canal de color RGB también de 8 bits. En seguida se empleó un factor de umbralización

every 10 cm and using a knife they were shredded at the corresponding positions, obtaining a total of 10 parts per leaf (Figure 5 a). From each section a sample of transversal section with a maximum thickness of 2 mm (Figure 5 b).

de 0.7 para obtener imágenes posterizadas en blanco y negro (Figura 4 b). El factor de umbralización se encontró a prueba y error para la iluminación proporcionada, el fondo empleado y las características de color y textura del objetivo. Con la imagen en blanco y negro el área transversal de la hoja de agave representada por píxeles blancos y el resto de la imagen en color negro, la rutina hecha en MATLAB se encargó de contar el número de píxeles blancos y convertirlos en área mediante un factor de conversión que se alimentó a la rutina del programa. Para obtener el factor de conversión se requiere realizar una calibración. Para el presente estudio se realizó una calibración para establecer el factor de conversión empleado en la rutina del programa, colocando 3 cuadros de papel blanco con diferente área; 1 cm², 9 cm² y 36cm². Una vez calibrado se procedió a realizar la toma de imágenes de los recortes de las hojas de agave.

El procedimiento para determinar el área transversal a cada 10 cm de la hoja de agave se describe a continuación. Se cortaron al azar cinco hojas de una planta de agave, las cuales fueron marcadas cada 10 cm y empleando una navaja fueron troceadas a estas respectivas posiciones, obteniendo un total de 10 trozos por hoja (Figura 5 a). De cada trozo se obtuvo una muestra de la sección transversal con un espesor máximo de 2 mm (Figura 5 b).

Se colocó la primera muestra de la hoja 1 sobre el fondo empleado en la toma de imágenes, centrándola. Posteriormente se tomó la imagen con la Cámara Web Intel CS120 y se ejecutó la rutina, calculando y registrando el área de la muestra. Esto se repitió para todas las muestras de la hoja 1 (Figura 6). De la misma manera se determinó el área de las muestras de las otras cuatro hojas, registrando todos los valores de área.

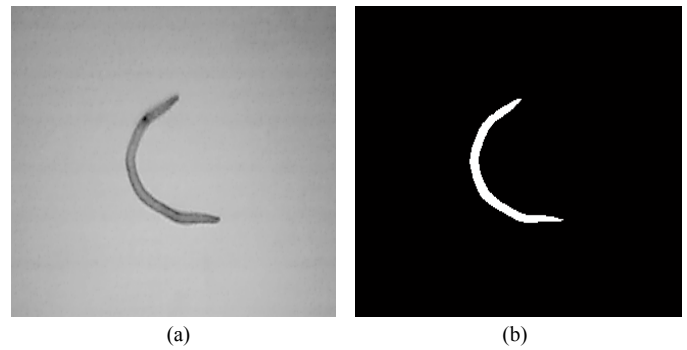


Figura 4. Posterización de imágenes; (a) nivel de grises con resolución de 8 bits; (b) blanco y negro.

Figure 4. Images processing; (a) gray levels at 8 bits resolution; and (b) white and black.

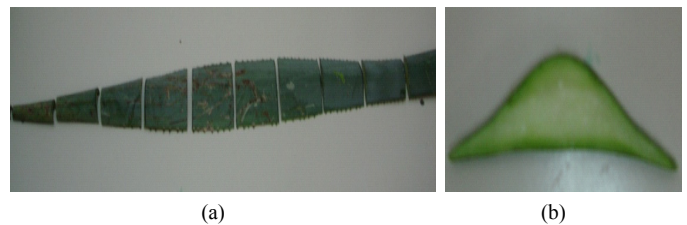


Figura 5. Hoja de agave; (a) seccionada en 10 partes de 0.1m; y (b) sección transversal a 0.7 m.

Figure 5. Agave leaf; (a) cut in 10 parts of 0.1m; and (b) transversal section at 0.7 m.

The first sample of leaf 1 was put over background used during image taking and centering it. Then image was taken with Intel CS120 web cam and routine was run, calculating and recording sample area. This was repeated for all samples of leaf 1 (Figure 6). This same procedure was used to determine areas from samples of other four leaves, recording

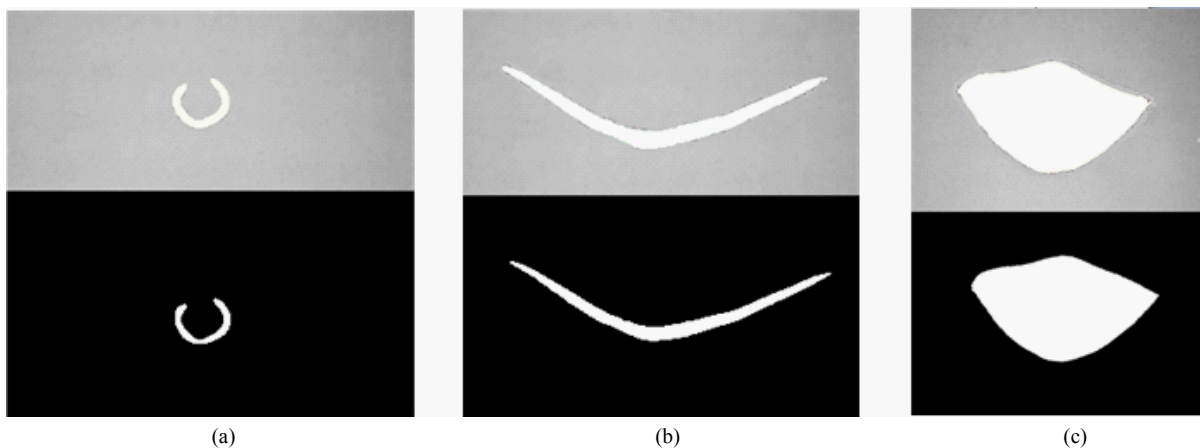


Figura 6. Imágenes de muestras a (a) 0.1 m; (b) 0.4 m; y (c) 1.0 m.

Figure 6. Images of samples at (a) 0.1 m; (b) 0.4 m; and (c) 1.0 m.

Una vez obtenidas las 10 áreas de cada una de las 5 hojas, se calculó el área media y la desviación estándar a las diferentes posiciones de la hoja de agave. Con el valor medio del área de la sección transversal de la hoja de agave y el valor de la energía de corte, ambos parámetros a las mismas posiciones de la hoja, se evaluó el valor promedio de la energía unitaria así como la relación de la energía con el área transversal (área- energía) en función de su posición en la hoja mediante una regresión polinomial elaborada en Microsoft Excel 2010.

Resultados y discusión

Determinación de dimensiones y pesos de la planta. En la Figura 7 se resumen las dimensiones encontradas a partir de las mediciones realizadas a las plantas de agave, sus valores medios se presentan en el Cuadro 1, junto con los valores mínimos, máximos y las desviaciones estándar.

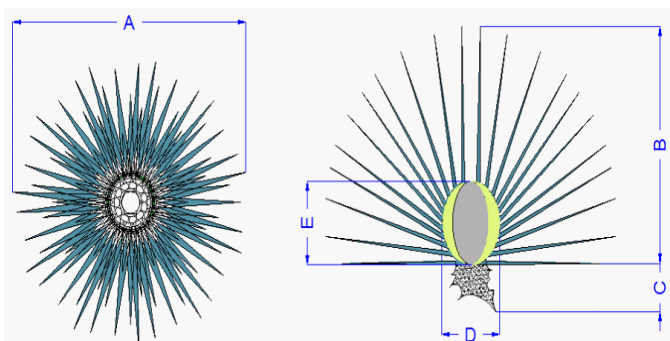


Figura 7. Dimensiones de la planta de agave y la piña.
Figure 7. Dimensions of agave plant and pineapple.

De los nueve valores registrados de peso de plantas sin raíz se obtuvo un valor medio de 132 kg, el valor máximo registrado fue de 143 kg y el mínimo de 125 kg con una desviación estándar de 6.9 kg. El valor medio obtenido del peso de la raíz fue de 29 kg con un máximo de 38 kg y un mínimo de 20 kg con una desviación estándar de 7.3 kg. Al extraer las plantas éstas presentaron suelo y piedras adheridas en diferentes proporciones. El valor medio, mínimo, máximo y desviación estándar del diámetro y altura de la piña se muestra de igual manera en el Cuadro 1. El valor medio del peso de la piña de agave fue 50 kg registrando un valor mínimo de 41 kg y un valor máximo de 60 kg con una desviación media de 6.6 kg.

Determinación de dimensiones y peso de la hoja. El número de hojas (considerando las hojas secas cerca de la base de la piña) máximo encontrado para una planta fue de

all area values. Once 10 areas from each one of five leaves were obtained, mean area and standard deviation were calculated at different positions of agave leaf. With mean value of area from transversal section of agave leaf and energy cut value, both parameters at same leaf position, it was calculated average value of unitary energy as well as relationship of energy with transversal area (area - energy) in function of its position in leaf by polynomial regression done in Microsoft Excel 2010.

Results and discussion

Determination of dimension and weights of plant. The Figure 7 summarizes dimensions found from measurements made to agave plants, their mean values are shown in Table 1, together with minimum, maximum and standard deviation values.

Cuadro 1. Propiedades físicas determinadas de la planta de agave.

Table 1. Physical properties determined from agave plant.

Propiedad física (m)	Valor medio	Mínimo	Máximo	Desviación estándar
A: diámetro máximo planta	2.43	2.20	2.75	0.22
B: altura de la planta	1.54	1.40	1.69	0.11
C: profundidad de raíz	0.51	0.31	0.60	0.12
D: altura de la piña	0.56	0.51	0.60	0.04
E: diámetro máximo piña	0.46	0.43	0.50	0.03

From nine recorded values of plants weight without root it was obtained mean value of 132 kg, the maximum recorded value was 143 kg and the minimum of 125 kg with a standard deviation of 6.9 kg. The mean value obtained for root weight was 29 kg with maximum of 38 kg and minimum of 20 kg with standard deviation of 7.3 kg. When extracting plants they had soil and stones adhered at different rates. The mean, minimum, maximum and standard deviation value of pineapple diameter and height are also shown in Table 1. Mean value of agave pineapple weight was 50 kg recording a minimum value of 41 kg and maximum value of 60 kg with standard deviation of 6.6 kg.

136 y el mínimo de 86 con un valor medio de 115 hojas y una desviación estándar de 19. La hoja tuvo un peso medio de 0.768 kg con un máximo de 0.862 kg y un mínimo de 0.666 kg con una desviación estándar de 0.091 kg. El Cuadro 2 muestra los valores obtenidos para las dimensiones determinadas a la hoja.

Existen pocos trabajos que reportan las dimensiones y pesos del *Agave tequilana* Weber; sin embargo, estos permiten comparar, corroborar o contrastar las diferencias o similitudes. Moreno *et al.* (2011) evaluó agaves de 16 parcelas y reportó un rango de pesos de 30 a 60 kg para *Agave tequilana* Weber y una desviación estándar en los datos reportados de 8.3 kg, con edades entre 6 y 8 años contra el rango reportado en este trabajo de 41 a 60 kg y desviación estándar de 6.6 kg para el mismo agave con edades entre 7 y 8 años. Los agaves de 6 años pudieran presentarse con menor peso, de lo anterior puede derivarse la diferencia en los rangos de peso y la menor desviación estándar en este trabajo. Asimismo, Háuad *et al.* (2010) presenta una descripción del *Agave tequilana* Weber en el cual reporta la altura de la planta, el largo de la hoja y el máximo ancho, los valores reportados son de entre 1.5 a 1.8 m, 1 a 1.45 m y 7 a 11 cm respectivamente, comparado con los valores reportados en este artículo de entre 1.40 a 1.69 m, 1 a 1.25 m y 7 a 11 cm respectivamente. Los valores entre los rangos de las variables descritas por Háuad *et al.* (2010) y los valores del presente estudio se traslapan coincidiendo con el mismo rango para el ancho de la hoja. Granados (1993) citado por Bautista *et al.* (2001) y Sierra *et al.* (2010) reporta un valor aproximado de la longitud de la hoja de 1.25 m, y un ancho entre 8 y 10 cm, valores similares a los encontrados en el presente trabajo.

Cuadro 2. Propiedades físicas determinadas de las hojas de agave.

Table 2. Physical properties of agave leaves.

Propiedad física	Valor medio	Mínimo	Máximo	Desviación estándar
A: largo (m)	1.08	1.00	1.25	0.05
B: ancho máximo (cm)	9.3	7.0	11.0	0.9
C: espesor máximo (cm)	2.7	2.0	4.0	0.5

Estimación de la energía de corte por sección (relación posición-energía). Una vez determinado el valor de la energía de corte cada 0.1 m a lo largo de cada una de cinco hojas se determinó el valor medio de energía en cada sección y la desviación estándar, lo anterior se muestra en el Cuadro 3.

Determination of leaf dimensions and weight. Maximum number of leaves (considering dry leaves near pineapple base) for one plant was 136 and minimum was 86 with mean value of 115 leaves and standard deviation of 19. Leaf had mean weight of 0.768 kg with maximum of 0.862 kg and minimum of 0.666 kg with a standard deviation of 0.091 kg. Table 2 shows values obtained for determined leaf dimensions.

There are few works reporting dimensions and weights of *Agave tequilana* Weber; however, these allow to compare, to prove or to show differences or similarities. Moreno *et al.* (2011) assessed agaves from 16 plots and reported weight range from 30 to 60 kg for *Agave tequilana* Weber and standard deviation of reported data of 8.3 kg, with ages between 6 and 8 against range reported in this work mfr 41 to 60 kg and standard deviation of 6.6 kg for same agave with ages between 7 and 8 years. Agaves of 6 years could have less weight, and this could be the reason of difference in weight ranges and less standard deviation in this work.

Also, Háuad *et al.* (2010) showed a description for *Agave tequilana* Weber in which reports plant height, leaf length and maximum width, at values between 1.40 to 1.69 m, 1 to 1.25 m and 7 to 11 cm, respectively. Values between ranges of variables described by Háuad *et al.* (2010) and values from this study are overlapped coinciding with the same range for leaf width. Granados (1993) quoted by Bautista *et al.* (2001) and Sierra *et al.* (2010) reports an approximate value of leaf length of 1.25 m, and a width between 8 and 10 cm, values similar to the ones found in this work.

Estimation of cut energy per section (relationship position-energy). Once is defined cut energy value every 0.1 m along each one of five leaves mean energy value in each section was determined and also the standard deviation, this is seen in Table 3.

Table 3 shows mean height and mean weight used to make proper cut at different positions, it is also seen that position and mean energy relationship is polynomial level 2 (Figure 8). At greater position of section in leaf the greater energy quantity required to make cut, this is because thickness increases when moving from tip to other end near pineapple.

Statistical regression model that had correlation coefficient near to 1 ($R^2=0.9836$), was second order polynomial, which is shown bellow.

$$E=20.341P^2+11.395P+1.5017 \quad (3)$$

Cuadro 3. Energía media en función de la posición de la sección a lo largo de la hoja de agave.
Table 3. Energy measured in function of position along agave leaf.

Distancia en hoja (m)	Altura pesa (m)	Pesa (kg)	Energía (J)					Desviación estándar	
			Hoja 1	Hoja 2	Hoja 3	Hoja 4	Hoja 5		
0.1	0.07	6	4.1	4.7	4.7	4.1	3.5	4.2	0.5
0.2	0.08	6	4.7	5.3	5.3	4.4	4.1	4.8	0.5
0.3	0.12	4	4.7	5.9	5.3	4.3	4.7	5.0	0.6
0.4	0.08	10	8.8	7.1	6.5	7.8	7.8	7.6	0.9
0.5	0.08	20	15.7	8.2	7.7	15.7	13.7	12.2	4.0
0.6	0.10	20	19.6	10.8	13.7	19.6	17.7	16.3	3.9
0.7	0.11	20	23.5	18.6	19.6	21.6	21.6	21.0	1.9
0.8	0.13	20	25.5	21.6	21.6	25.5	25.5	23.9	2.1
0.9	0.15	20	27.5	32.4	29.4	29.4	29.4	29.6	1.8
1.0	0.16	20	29.4	34.3	30.4	31.4	31.4	31.4	1.8

El Cuadro 3 muestra la altura media y el peso medio utilizados para realizar un corte satisfactorio en las diferentes posiciones de la hoja, también se observa que la relación de la posición y la energía media es polinomial de grado dos (Figura 8). A mayor posición de la sección a lo largo de la hoja se requiere de una mayor cantidad de energía para realizar el corte, esto se debe a que el grosor aumenta al moverse de la punta de la hoja hacia el extremo unido a la piña.

El modelo estadístico de regresión que presentó el coeficiente de correlación más cercano a 1 ($R^2=0.9836$), fue el polinomial de segundo orden, que se muestra a continuación.

$$E=20.341P^2+11.395P+1.5017 \tag{3}$$

Donde: E= a la energía necesaria para el corte medida en Joules y P es la posición de la hoja medida a partir de la punta en centímetros. La ecuación anterior puede emplearse para determinar la energía que requiere el corte de la hoja en cualquier posición propuesta. Es importante destacar que a partir de los 0.3 m los valores de energía en función de la posición de la hoja muestran una tendencia lineal ($R^2=0.994$), muy probablemente las posiciones de 0.1 y 0.2 m presentaban un grosor y área pequeños y muy parecidos.

Determinación del área transversal de la hoja por sección (relación área- energía y posición-área). En el Cuadro 4 se muestran las áreas obtenidas de cada una de las 10 secciones a lo largo de cada una de las cinco

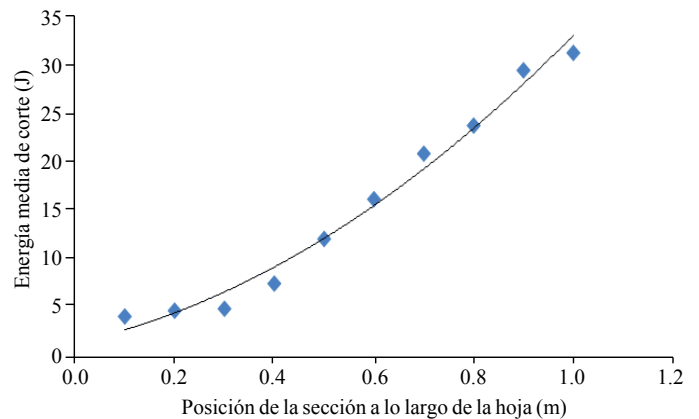


Figura 8. Relación posición de la sección a lo largo de la hoja-energía media de corte.

Figure 8. Relationship position of section along leaf-mean cut energy.

Where: E= energy required for cut measured in Joules and P is position of leaf measured from tip in centimeters. This equation can be used to define energy required to cut leaf at any given position. It is important to mention that from 0.3 energy values in function of leaf position had a lineal trend ($R^2=0.994$), it is likely positions 0.1 and 0.2 m had small and similar thickness and area.

Determination of transversal area of leaf per section (relationship area-energy and position-area). Table 4 shows areas obtained from each one of ten sections along five agave leaves, as well mean area and standard deviation. In this table it can also be seen that from 0.9 m of distance standard deviation increases considerably if compared with the rest of the values; this could be due

hojas de agave, así mismo el área media y la desviación estándar. En dicho cuadro también se puede observar que a partir de los 0.9 m de distancia la desviación estándar aumenta considerablemente comparada con los demás valores; lo anterior se puede deber a que no todas las hojas tienen exactamente la misma longitud y por ende en las hojas más cortas se empieza a exhibir la unión de la hoja con la piña.

not all leaves have exactly the same length and therefore in shorter leaves becomes more evident the bond with pineapple.

The equation that rules transversal area behavior in function of position in the leaf is the following.

$$A=26.875P^2 - 10.948P + 2.51420582 \quad (4)$$

Cuadro 4. Área de la sección transversal a lo largo de la longitud de las hojas.

Table 4. Transversal section area along leaves length.

Posición de sección a lo largo de la hoja (m)	Área (cm ²)						Desviación estándar
	Hoja 1	Hoja 2	Hoja 3	Hoja 4	Hoja 5	Media	
0.1	0.7971	0.6978	0.7716	0.7211	0.7284	0.7432	0.0403
0.2	1.5558	1.4245	1.5388	1.5259	1.3767	1.4843	0.0790
0.3	2.2441	2.3115	2.3621	2.3421	2.3623	2.3244	0.0495
0.4	3.3829	3.4983	3.5820	3.5332	3.6699	3.5333	0.1059
0.5	4.0838	4.1123	4.4692	4.3374	4.5421	4.3090	0.2063
0.6	5.5002	5.2801	5.6239	5.0766	5.6391	5.4240	0.2416
0.7	6.8521	7.4236	7.3065	6.9691	7.8093	7.2721	0.3811
0.8	9.6948	9.9158	9.9413	10.1597	9.6612	9.8746	0.2033
0.9	13.4025	13.2066	12.3403	13.7107	14.2707	13.3862	0.7096
1.0	21.1527	16.9723	20.6078	18.0891	23.4263	20.0496	2.5614

La ecuación que rige el comportamiento del área transversal en función de la posición de la sección a lo largo de la hoja se presenta a continuación.

$$A=26.875P^2 - 10.948P + 2.51420582 \quad (4)$$

Donde: A= a el área transversal de la hoja en centímetros cuadrados y P es la posición de la sección a lo largo de la hoja en metros. La función tiene un comportamiento polinomial de segundo orden con una R² de 0.975, al aumentar la posición de la hoja el valor de área transversal incrementa. Empleando los valores medios del área de la sección transversal de la hoja de agave (Cuadro 4) y los valores medios de la energía de corte (Cuadro 3), ambos parámetros a las mismas posiciones en la hoja, se evaluó el valor promedio de la energía unitaria, resultando un valor de 2.50 J cm⁻².

La relación área- energía se puede observar en la Figura 9, donde se aprecia un comportamiento polinomial de orden 2 con una R² de 0.9789; al aumentar el área en la posición de la hoja el valor de energía incrementa. La ecuación que rige el comportamiento de la energía media de corte en función del área de la sección transversal se presenta a continuación.

Where: A= transversal area of leave in square centimeters and P is position throughout leave in meters. Function has second order polynomial behavior with R² of 0.975, when position increases transversal area increases too. Using mean values of transversal section of agave leaf (Table 4) and mean values of cut energy (Table 3), both parameters at same leaves position, it was assessed average value of unitary energy, resulting a value of 2.50 J cm⁻².

Relationship area-energy can be seen in Figure 9, where second order polynomial behavior is detected with an R² of 0.9789; when increasing area in leaf position, energy increases. The equation that rules mean energy behavior in function of transversal section area is the following.

$$E=-0.0903A^2 + 3.4185A - 0.5566 \quad (5)$$

Where: E= required energy for cut measured in Joules; and A= transversal section area in square centimeters.

The growth bellow linear behavior in relationship energy/area can be due decrease in relationship perimeter/area of leaf section. In the extent the section increases, the

$$E = -0.0903A^2 + 3.4185A - 0.5566 \quad (5)$$

Donde: E= a la energía necesaria para el corte medida en Joules; y A= a el área de la sección transversal respectiva en centímetros cuadrados.

El crecimiento menor al lineal en la relación energía/área puede deberse al decremento de la relación perímetro/área de la sección de la hoja. Conforme aumenta la sección se va reduciendo el contenido relativo de la piel, más dura para el corte que el interior de la hoja. Calculando con los datos del cuadro 3 y 4 la energía unitaria del corte para la distancia de 1m, es decir para una sección a 8 cm de la base de la hoja, resulta el valor de 1.56 J cm⁻². Este valor puede compararse con los resultados obtenidos por Majaja y Chancellor (1997) para el corte de hojas de sisal a 7 cm de la base, de los cuales puede deducirse el valor de la energía unitaria de corte de 0.59 J cm⁻² empleando cuchilla de hoja delgada y hasta 1.32 J cm⁻² con herramientas cortantes tipo cizalla, comúnmente utilizadas en la poda de árboles. Es notable la similitud de los resultados, tomando en cuenta que las propiedades de cada especie, la geometría de las herramientas cortantes, así como las velocidades de corte proporcionadas por los dispositivos de prueba empleados influyen en los valores de energía de corte determinados.

Conclusiones

Las dimensiones y pesos determinados de la planta de agave así como de cada uno de sus elementos presentan una cierta variabilidad que se debe a los factores de desarrollo propio de cada planta. Sin embargo, pueden considerarse característicos para una planta de agave de 7 a 8 años de edad. Se propuso y validó una metodología para determinar la energía requerida para el troceado de las hojas de agave. Existe una relación bien definida entre la posición de la sección a lo largo de la hoja y la energía de corte que puede ser explicada en términos de cambio del área de la sección transversal de la hoja, es decir, a medida que la distancia aumenta partiendo de la punta de la hoja hacia la unión de ésta con la piña el área incrementa de acuerdo a un polinomio de orden 2 y lo mismo se puede observar en la mediciones hechas para la energía de corte. El valor de la energía unitaria determinada muestra que requiere de 2.50 J para cortar transversalmente un centímetro cuadrado de hoja de agave usando la geometría de las cuchillas

relative skin content reduces, being harder for cut than leaf internal part. Calculating with data from Table 3 and 4 cut unitary energy for 1m distance, in other words for a section at 8 cm from leaf base, gives the value of 1.56 J cm⁻². This value can be compared with results obtained by Majaja and Chancellor (1997) for leaves cut of sisal at 7 cm from base, from which can be defined unitary cut energy value of 0.59 J cm⁻² using thin sheet knife and up to 1.32 J cm⁻² with cutting tools like shear, commonly used in trees prune. It is remarkable the similar results, taking into account that each species properties, geometry of cutting tools, as well as cut speeds used by test devices affect in a given cut energy value.

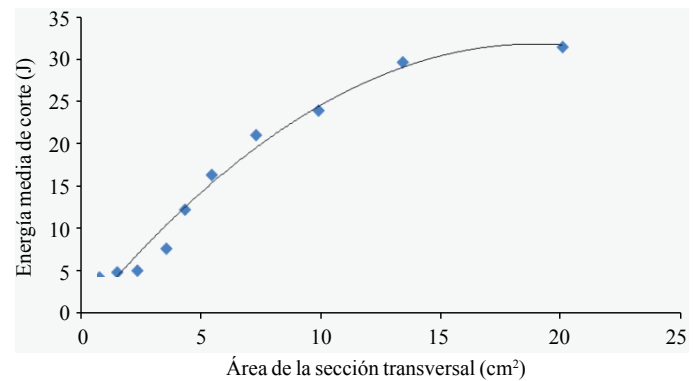


Figura 9. Relación área de sección transversal - energía media de corte.

Figure 9. Relationship transversal section area-mean cut energy.

Conclusions

Dimensions and weights determined for agave plant as well as each one of its elements have some variability due plant development factors. However, they can be considered characteristic for a 7 to 8 years age agave plant. A methodology to determine required energy for agave leaves shredding was proposed and validated. There is a well defined relationship between section positions in leaf and cut energy that can be explained in terms of change of leaf transversal area, this means, in the extent distance increases from tip to bond with pineapple the area increases according to a second order polynomial and this same effect can be seen in measurements done for cut energy. Unitary energy value determined shows that it requires 2.50 J to cut one square inch of agave leaf using geometry of commonly used knives in this type of

comúnmente empleadas en esta clase de maquinaria. Los valores obtenidos en el presente trabajo pueden aplicarse en el diseño de maquinaria para la mecanización de la cosecha y procesamiento del *Agave tequilana* Weber.

machinery. Obtained values herein can apply in the design of mechanization machine for harvest and processing of *Agave tequilana* Weber.

End of the English version



Agradecimientos

A los organismos de financiamiento: Consejo de Ciencia y Tecnología (CONACYT) y al Consejo de Ciencia y Tecnología del estado de Guanajuato (CONCYTEG) por la aportación de recursos para el desarrollo del proyecto “Diseño y construcción de una cosechadora- trituradora de agave”, (GTO-2009-02-118718) del cual emerge el presente estudio y la formación de recursos humanos en licenciatura y posgrado. A la División de Ciencias de la Vida (DICIVA) y a la tequilera “Real de Pénjamo” por su valiosa aportación de recursos humanos, materia prima (agave) y maquinaria agrícola para la realización del presente trabajo.

Literatura citada

- Bautista, J. M.; García, O. L.; Barboza, C. J. E. y Parra, N. L. A. 2001. El *agave Tequilana* Weber y la producción de tequila. *Acta Universitaria*. 11(2):26-34.
- Cáceres, F. M.; Lappe, O. P.; Larqué, S. A.; Magdub, M. A. y Barahona, P. L. 2009. Producción de etanol a partir de jugo de henequén (*Agave fourcroydes* Lem.) y melaza utilizando una mezcla de levaduras. XIII Congreso Nacional de Biotecnología y Bioingeniería. VII Simposio Internacional de producción de alcoholes y levaduras. Acapulco, Guerrero, México del 21 al 25 de junio 2009.
- Davis, S. C.; Dohleman, F. G. and Long, S. P. 2011. The global potential for Agave as a biofuel feedstock. *GCB Bioenergy*. 3(1):68-78.
- González, P. G. 2008. Producción potencial de bioetanol a partir de diferentes especies de agave en el estado de Guanajuato. Tesis de licenciatura. Instituto de Ciencias Agrícolas de la Universidad de Guanajuato. 62 p.
- Granados, S. D. 1993. Los Agaves en México. Universidad Autónoma de Chapingo. México. 256 p.
- Háuad, M. L. A.; Rodríguez, P. C.; Franco, M.; Castillo, P.; Vázquez, A. R. y Rojas, M. A. 2010. Propiedades terapéuticas de *Agave tequilana*. Weber. *Toctli RICTB* 2010.
- Holtum, J. A. M.; Chambers, D.; Morgan, T. and Tan, D. K. T. 2011. Agave as a biofuel feedstock in Australia. *GCB Bioenergy*. 3(1):58-67.
- Instituto Nacional de Estadística Geográfica e Informática (INEGI) 2010. Distribución de localidades, según su altitud sobre el nivel del mar. www.inegi.gob.mx/. 25 de noviembre de 2010.
- Irtwange, S. V. and Igbeka, J. C. 2002. Some physical properties of two African yam bean (*Sphenostylis stenocarpa*) accessions and their Interrelations with Moisture Content. *J. Appl. Eng. Agric. ASAE*. 18 (5): 567-576.
- Isik, E. 2007. Some physical and mechanical properties of round red lentil grains. *J. Applied Eng. Agric. ASAE*. 23(4):503-509.
- Luther, R. W.; Suter, D. A. and Brusewitz, G. H. 2004. Physical properties of food materials. Chapter 2 in *Food and Process Engineering Technology*. 23-52. St. Joseph, Michigan: ASAE. *Ame. Soc. Agric. Eng.*
- Madrigal, L. R. 2009. Agaves para producir bioetanol. Seminario: México después del petróleo, ¿Serán los biocombustibles y geotermia una alternativa?, México, D. F. 21 de septiembre 2009.
- Majaja, B. A. and Chancellor, W. J. 1997. The potential for mechanical harvest of sisal. *Ame. Soc. Agric. Eng.* 13(6):703-708.
- Moreno, H. A.; Estrella, C. N.; Escobedo, G. S.; Bustamante, G. A. y Gerritsen, P. W. 2011. Prácticas de manejo agronómico para la sustentabilidad: características y medición en *agave Tequilana* Weber en la región. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*. 14(1):59-169.
- Moritz, H. 1988. Geodetic reference system 1980. *Geodesist handbook, bulletin Geodesique*. 62(3).

- Núñez, H. M.; Rodríguez, L. F.; and Khanna, M. 2011. Agave for tequila and biofuels: an economic assessment and potential opportunities. *GCB Bioenergy*. 3(1):43-57.
- Owolarafe, O. K. and Shotonde, H. O. 2004. Some physical properties of fresh okro fruit. *J. Food Eng.* 63(3):299-302.
- Sierra, S. L. A. 2011. Estudio y diseño del mecanismo desfibrador de una cosechadora- trituradora de agave. Tesis de licenciatura. División de Ciencias de la Vida de la Universidad de Guanajuato. 198 p.
- Sierra, S. L. A.; Gutiérrez, V. C.; Saldaña, R. A. y Serwatowski, H. R. 2010. Energía necesaria para el corte de la piña de agave con cuchillas de diferente borde cortante. Memorias del XIX Congreso Nacional de Ingeniería Agrícola. Saltillo, Coahuila, México del 8 al 10 de septiembre de 2010.
- Thulin, A. 1992. A "standardized" gravity formula. *Bulletin OIML- N° 127- June 1992- MIML*.
- Whitney, G. K.; Lioutas, S. T.; Henderson, W. L. and Combs, L. Inventors. August 29 of 2002. Production for tequila. United States Patent US 2002/0119217 A1.