

INVESTIGACIÓN TECNOLÓGICA

Determinación de las propiedades mecánicas del Tallo de la Quinua

Miguel A. Ruiz Orellana

Ing. Mecánico, M. Sc Docente Investigador
de la Universidad Técnica de Oruro (UTO)
miguel-ruiz@mecanica.edu.bo

Raúl Choque Ibarra

Egr. Ing. Mecánico, Asistente de Investigación
de la Universidad Técnica de Oruro (UTO)
raulinhow@hotmail.com

RESUMEN

El presente trabajo trata de documentar las propiedades mecánicas del tallo de la quinua. Para realizar las pruebas de esfuerzo cortante, esfuerzo de flexión y módulo de elasticidad se ha dividido los tallos de las quinuas en tres tramos: A inferior, B medio y C superior, dado que la resistencia varía para cada sección. Se ha trabajado con tres variedades de quinua, la Kellu, la Real Blanca y la Negra.

Se han realizado pruebas de esfuerzo cortante por el método de cortante simple obteniendo para la variedad Kellu, valores promedio de 4.82 MPa para un porcentaje promedio de humedad de 7.73% en el tramo inferior, 5.78 MPa para una humedad de 8.38% en la parte media y un esfuerzo de 7.58 MPa para una humedad de 8.85% en la parte superior. Para la quinua Real Blanca se ha encontrado esfuerzos de corte de 3.63 MPa, 4.67 MPa y 8.86 MPa con porcentajes de humedad de 11.69%, 10.38% y 9.23% para los tramos A, B y C respectivamente.

En las pruebas de flexión se ha obtenido esfuerzos de bio-fluencia de 12.49 MPa, 7.60 MPa y 11.04 MPa con módulos de elasticidad de 19.22 GPa, 10.49 GPa y 27.89 GPa para los tramos A, B y C de la quinua Kellu; siendo que la Quinua Real Blanca ha mostrado esfuerzos de bio-fluencia de 10.26 MPa, 5.64 MPa y 29.37 MPa con módulos de elasticidad de 8.70 GPa, 8.19 GPa y 20.24 GPa para los tramos A, B y C respectivamente.

Los ensayos con la quinua negra dan valores más altos, teniendo esfuerzos de flexión de 15.23 MPa, 7.66 MPa y 25.02 MPa con módulos de elasticidad de 23.07 GPa, 8.73 GPa y 29.37 GPa para los tramos A, B y C respectivamente, llegando a determinar que es la variedad que tiene mayor resistencia mecánica tanto a esfuerzos de flexión como a esfuerzos de corte.

Palabras claves: Propiedades mecánicas, quinua, esfuerzo de corte, esfuerzo de flexión, módulo de elasticidad, bio-fluencia.

ABSTRACT

The present work tries to document the mechanical properties of the stem of quinoa. To realize the tests of shearing strain, bending stress and modulus of elasticity have been divided the stems of quinoas in three sections: A lower, B middle and C upper, because the resistance varies for each section. One has worked with three varieties of quinoa, the Kellu, the Real White and the Black.

Tests of shearing strain by the shearing along method have been realized obtaining for the Kellu variety, values average of 4,82 MPa for a percentage average of humidity of 7,73% in the lower section, 5,78 MPa for a humidity of 8,38% in middle part and a 7,58 MPa for a humidity of 8,85% in the upper region. For the Real White has been efforts of cuts of 3,63 MPa, 4,67 MPa and 8,86 MPa with percentage of humidity of 11,69%, 10,38% and 9,23% for the sections A, B and C respectively.

In the bending tests has been obtained efforts of bio-yield of 12,49 MPa, 7,60 MPa and 11,04 MPa with modulus of elasticity of 19,22 GPa, 10,49 GPa and 27,89 GPa for the sections A, B and C of Kellu variety; the Real White Quinoa has shown efforts of bio-yield of 10,26 MPa, 5,64 MPa and 29,37 MPa with modulus of elasticity of 8,70 GPa, 8,19 GPa and 20,24 GPa for the sections A, B and C respectively.

The tests with black quinoa give higher values, having bending stress of 15,23 MPa, 7,66 MPa and 25,02 MPa with modulus of elasticity of 23,07 GPa, 8,73 GPa and 29,37 GPa for the sections A, B and C respectively, getting to determine that it is the variety that has more mechanical resistance to bending stress as to shearing stress.

KEYWORDS: Mechanical properties, quinoa, shear stress, bending stress, Young module, bio-yield.

1. INTRODUCCIÓN

La obtención de las propiedades mecánicas de las plantas es de vital importancia para el diseño de maquinaria agrícola (Galedar et al. 2009), pudiendo determinar a partir de ellas las sollicitaciones de tensión en cada elemento del equipo así como la potencia consumida por este. Las propiedades mecánicas más importantes a determinar son el esfuerzo de flexión, el esfuerzo de corte, el módulo de elasticidad y la energía específica de corte (Taghinezhad, Alimardani, y Jafari 2013). Para determinar estos parámetros se debe estructurar el estudio considerando variables como el porcentaje de humedad (%H), sección del tallo en función de la altura del mismo (A, B, C), el diámetro del tallo de acuerdo a la sección (Bright R and Kleis E. 1964). En el presente estudio se ha trabajado con tres variedades de la quinoa, la Real Blanca, la Negra y la Kellu.

La mecanización en la producción de la quinoa se ha ido desarrollando desde 1984 (LA PATRIA 2009) habiéndose avanzado con bastante éxito en los equipos de siembra desde la producción de la SATIRI I. Los equipos para la cosecha de quinoa llevan ya varios intentos sin llegar a obtener aún una máquina que satisfaga las condiciones de trabajo. Se han desarrollado adaptaciones empíricas como las segadoras de pasto que no han resuelto la necesidad al comprometer en su funcionamiento una pérdida considerable del grano; también se han probado máquinas combinadas con sistema de recolección por molinete encontrando a la vez que estas llegan a pisar la planta de quinoa provocando nuevamente la pérdida del grano. En ambos casos se tiene un común denominador que es la práctica empírica del laboreo, la cual se ejerce por la falta de datos en cuanto a característica física mecánica de la planta de quinoa. En el presente estudio se encara la obtención de las propiedades mecánicas del tallo de la quinoa así como las mejores condiciones de los implementos de corte (Mariuz Szymanek 2007).

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Método

Las propiedades físicas más importantes para el estudio del corte y cosechado de una planta son la resistencia a compresión, tracción, flexión, densidad y fricción (Ince et al. 2005). También se ha determinado que las propiedades físicas de la planta varían en función del porcentaje de humedad que esta presenta, y las diferentes secciones de la altura del tallo (Bright R and Kleis E. 1964), mismas que presentan valores diferenciados. En el estudio de las propiedades mecánicas del tallo del azafrán (Shahbazi et al. 2011) divide el tallo en tres partes para su estudio (A superior, B medio y C inferior) dejando un tramo inferior D, fuera de estudio entendiéndose es la parte que se pierde en el momento de la cosecha, Ince también propone la misma división para el estudio del girasol considerando que el tramo inferior D es inferior a los 70 mm.

La determinación del esfuerzo de flexión, esfuerzo de corte y módulo de elasticidad del tallo de la quinua pasa por una fase experimental para la cual se ha dividido los tallos de la quinua en tres partes (A inferior, B medio, C superior) para ensayar y buscar resultados en los tres tramos (figura 1).



Figura 1. División del tallo de quinua.

2.2. Determinación de la Resistencia Mecánica al Corte

La determinación de la resistencia a corte de los tallos de plantas en su gran mayoría se realiza siguiendo el uso de tres tipos de implementos de corte, todos accionados por un actuador que genera la fuerza de corte y sensores que miden la fuerza y desplazamiento de la cuchilla en el tiempo.

Prueba de corte de Warner-Bratzler

En esta prueba el implemento de corte presenta un doble borde con filo (figura 2), llegando a seccionar el espécimen por ambos lados al mismo tiempo. Las pruebas de corte realizadas con el método de Warner-Bratzler son por lo general para material blando utilizado frecuentemente en alimentos (Igathinathane et al. 2010). En la figura 2 se muestra la cuchilla utilizada en la prueba, cuyo ángulo de filo de las cuchillas es de 30°, el ángulo entre filos es de 60° y el espesor estándar del implemento es de 1.02 mm; para las pruebas con tallos más duros se ha modificado las dimensiones del espesor de la cuchilla a 3.175 mm tal como ejecuta Igathinathane en sus experimentos con el tallo del maíz.

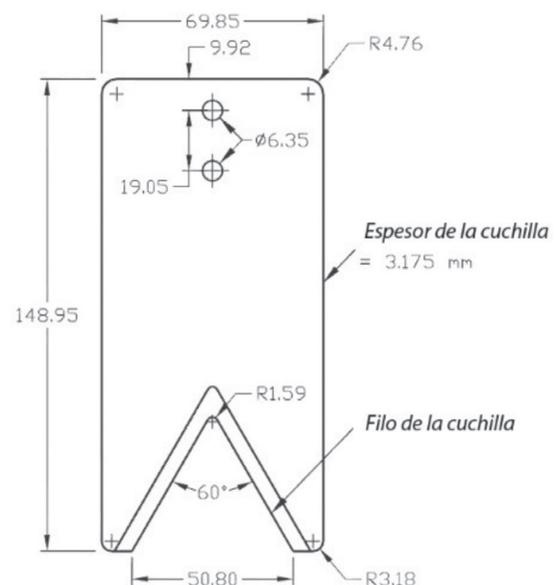


Figura 2. Cuchilla para prueba de Warner-Bratzler.

El mecanismo completo consiste en una caja calada con una ranura para la cuchilla y el resto de la base llena para que se apoye el espécimen, la fuerza de corte proveniente de la parte superior y va cortando el tallo por su sección transversal mientras un sensor conectado a la cuchilla viene censando la fuerza y el desplazamiento.

La ecuación para calcular el esfuerzo último de corte es:

$$\tau_u = \frac{F_c}{A} \quad (1)$$

Donde τ_u es el esfuerzo último a corte en [Pa], F_c la fuerza de corte en [N] y A es el área transversal de la sección en [m²].

Prueba de corte por la caja de corte (shear box)

Otro implemento utilizado para obtener la resistencia al corte del tallo de una planta es la llamada “caja de corte” (figura 3), consistente en dos placas fijas de 6 mm de espesor, separadas ambas por otra placa móvil de 6 mm de espesor y muy poca holgura, las placas fijas presentan perforaciones por las cuales pasa el tallo de la planta (Galedar et. al 2008).



Figura 3. Prueba cortante por “Caja de Corte”.

Una vez colocado el tallo, la placa móvil que no tiene filo, secciona al mismo produciendo el corte por ambos lados de la sujeción (doble cortante) pudiendo describir la ecuación de esfuerzo como:

$$\tau_u = \frac{F_c}{2A} \quad (2)$$

Donde τ_u es el esfuerzo último a corte en [Pa], F_c la fuerza de corte en [N] y A es el área transversal de la sección en [m²] (Taghijarah et al. 2011), multiplicada por 2 por efecto de la doble cortante tal como se aprecia en la figura 4.

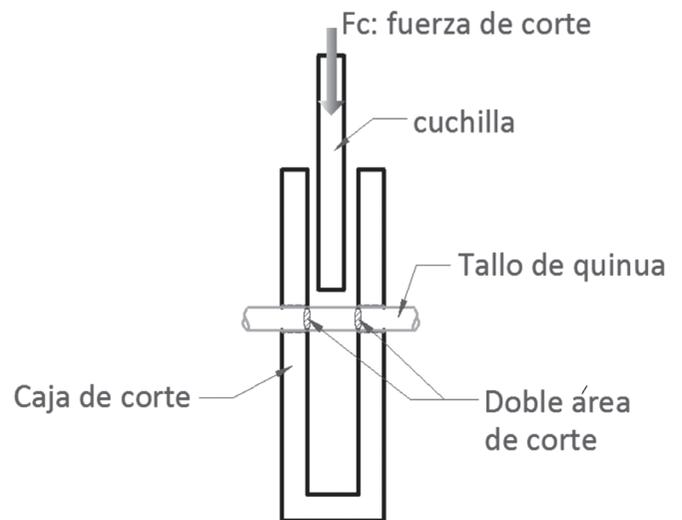


Figura 4. Efecto de la doble cortante en la “Caja de Corte”.

Prueba de corte de cortante simple

Un tercer implemento utilizado para determinar la resistencia a corte del tallo es la prueba de cortante simple, consistente en tener una sujeción fija compuesta por dos placas con perforaciones por donde pasa el tallo de la planta, tal cual la caja de corte; en la sección media, en vez que se tenga una cuchilla sin filo que produce doble cortante se emplea una cuchilla de 3 a 6 mm de espesor, afilada con un ángulo de 30°, 45° ó 60° (Heidari 2012). En la figura 5 se esquematiza el área de corte.

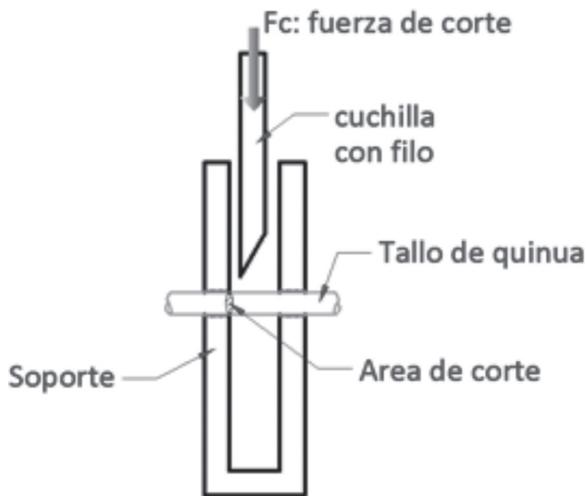


Figura 5. Prueba de cortante simple.

La ecuación para calcular el esfuerzo último de corte es:

$$\tau_u = \frac{F_c}{A} \quad (3)$$

Donde τ_u es el esfuerzo último a corte en [Pa], F_c la fuerza de corte en [N] y A es el área transversal de la sección en [m²].

La determinación del esfuerzo de corte se ha realizado utilizando este método, para lo cual se ha construido los implementos necesarios, así las placas son de acero estructural A36, de ¼" de espesor, se encuentran separadas una distancia de 19 mm, la cuchilla también es de acero A36 de ¼" de espesor con un ancho de 50 mm (figura 6 y 7). Las perforaciones de las placas fijas son de 1"; tanto placas como cuchilla llevan un adaptador que permite su sujeción a las mordazas de la banca de tracción.

La toma de datos se realiza por medio del colector ADMET de la banca de tracción, registrando solo la fuerza de corte.

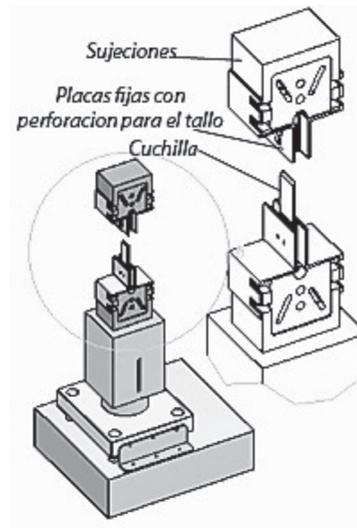


Figura 6. Implementos para la prueba de cortante simple.

Para el cálculo del área de la sección transversal de la quinua, se asemeja esta a una sección tubular redonda pudiendo determinar el área mediante la ecuación $A_r = \pi \cdot (r_e^2 - r_i^2)$. Además se ha tomado fotografías a escala de la sección, llevando estas al software Autocad para calcular así con mayor precisión su sección transversal. La velocidad de avance de la cuchilla ha sido de 1.5 mm/s, no habiendo experimentado el efecto de corte con la variación de la velocidad de carga tal como realizaron (Chattopadhyay & Pandey 1999) en su estudio de deformación cuasi estática del tallo de Sorgo.

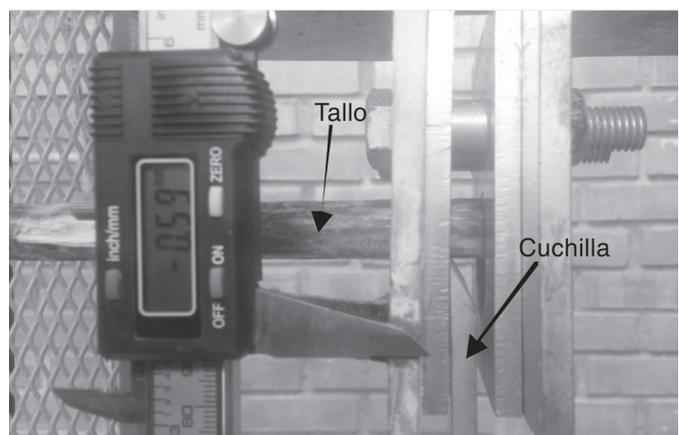


Figura 7. Montaje de la prueba de cortante simple.

Pruebas de flexión

Las pruebas de flexión nos permiten determinar el la resistencia a flexión del tallo, y por medio del registro conjunto de la fuerza y la deformación del tallo se puede determinar el módulo de elasticidad de este.

Equipo para prueba por flexión por tres puntos

El implemento para la prueba de flexión de tres puntos consiste en tener dos apoyos fijos puntuales que se pueden obtener generando dos superficies cilíndricas, cuya línea de contacto se considera como puntual y un tercer punto de contacto que representa la carga puntual aplicada a la mitad del espécimen (figura 8).

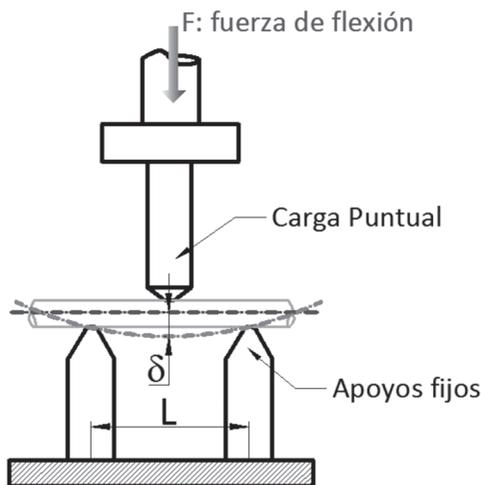


Figura 8. Esquema para prueba de flexión en tres puntos.

Para la determinación del esfuerzo de flexión y del módulo de elasticidad primeramente se debe registrar las dimensiones de la sección transversal del tallo para poder calcular el momento de inercia de sección (Galedar et. al 2008). Considerando a la sección del tallo de forma circular hueca, el momento de inercia será:

$$I_{XX} = \frac{\pi}{64} \cdot (d_e^4 - d_i^4) \quad (4)$$

Donde “de” es el diámetro externo del tallo y “di” es el diámetro interno del mismo, ambos expresados en [mm].

El esfuerzo de flexión que sufre el tallo vendrá definido por:

$$\sigma_f = \frac{M_f \cdot c}{I_{XX}} \quad (5)$$

Donde el momento flector “Mf”, viene definido por:

$$M_f = \frac{F \cdot L}{4} \quad (6)$$

Siendo “F” la fuerza puntual expresado en [N], “L” la longitud entre los apoyos fijos en unidades [mm]. El valor de “c” está definido como la distancia desde el centro geométrico de la sección hasta el extremo exterior, que para el caso de una sección circular sería “de/2”. Al estar todas las variables definidas, se puede obtener el esfuerzo de flexión. Apoyados en la ecuación de deflexión, que por definición es:

$$\delta = \frac{F \cdot L^3}{48 \cdot E \cdot I_{XX}} \quad (7)$$

Se despeja el módulo elasticidad, llegando a obtener la siguiente expresión:

$$E = \frac{F \cdot L^3}{48 \cdot \delta \cdot I_{XX}} \quad (8)$$

El módulo de Young expresado en [GPa].

Para la realización de los ensayos, se ha construido dos apoyos puntuales consistentes en dos placas de acero A36 de ¼” de espesor, con borde redondeado asegurando se tenga una línea de contacto con el tallo de la quinua; la separación entre apoyos es de 108 mm, siendo este el valor de la longitud “L” en la ecuación (6). Por la parte media, viene una tercera placa del mismo material y espesor, también con borde redondeado asegurando un apoyo lineal por la parte del medio, constituyéndose el tercer punto ubicado a “L/2” (figura 9) conforme describe (Galedar et al. 2008).

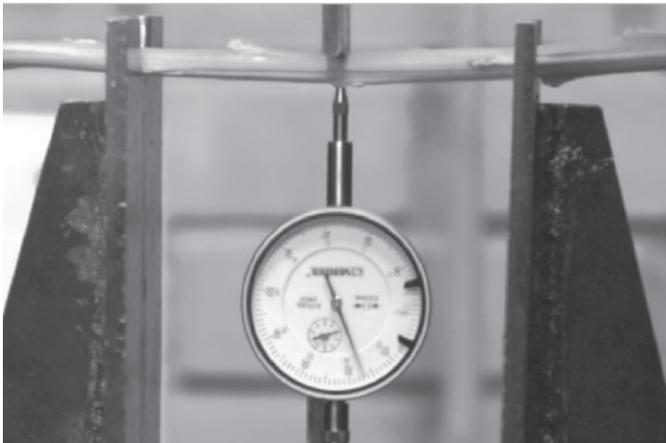


Figura 9. Montaje de la prueba de flexión en tres puntos.

Por la parte inferior al tallo, se coloca un reloj comparador con capacidad de lectura hasta 10 mm y una precisión de 0.1 mm. Como mejora de este primer diseño, se ha sustituido el reloj comparador por un sensor de ultrasonido acoplado al tercer punto móvil con su receptor en la base de los puntos (figura 10). Este sensor nos permite registrar el desplazamiento continuo durante la prueba.

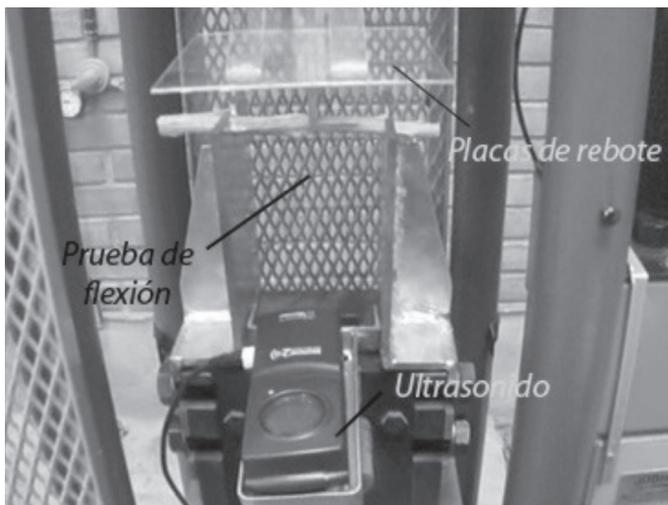


Figura 10. Prueba de flexión en tres puntos con sensor de ultrasonido.

Las pruebas se han realizado en una banca de tracción registrando los valores de fuerza mediante un colector de datos ADMET (figura 11).

Con los datos registrados y las ecuaciones (5), (6) y (8) se determinaron los esfuerzos de flexión y módulo de elasticidad.

La velocidad de aplicación de la carga ha sido de 1.5 m/s, no habiendo realizado pruebas con variación de velocidad respaldando esta decisión en los resultados de pruebas de flexión en Sorgo realizadas por (Chattopadhyay & Pandey 1999), donde la variación del esfuerzo de flexión no sobrepasa el 5% debido a la variación de la velocidad de aplicación de carga que va desde 10 a 100 mm/min.



Figura 11. Banca de tracción con colector ADMET.

En el procesamiento de datos se ha determinado la resistencia a flexión y módulo de elasticidad en los tres niveles del tallo, de tres variedades de quinua y clasificados por porcentaje de humedad.

Pruebas de flexión en voladizo

Otra prueba para determinar la resistencia a flexión y el módulo de elasticidad de los tallos de las plantas es por medio de la prueba de flexión en voladizo, tal como realizó Ince en sus estudios de flexión en tallo de girasol (Ince et al. 2005), y (Esehaghbeygi et al. 2009) en su trabajo de flexión y corte del tallo del trigo de la variedad Alvand.

La prueba consiste en fijar un extremo del tallo de forma rígida por medio de una prensa, a una distancia corta del extremo fijo se tira por medio de un cordón inextensible con una fuerza registrada por medio de una celda de carga mientras que a la vez se va grabando los desplazamientos (figura 12). A una distancia determinada, se mide el valor de la fuerza y desplazamiento permitiendo obtener el módulo de elasticidad por medio de la expresión siguiente:

$$E = \frac{F \cdot L^3}{3 \cdot \delta \cdot I_{XX}} \quad (9)$$

El valor del esfuerzo de flexión se puede obtener con la ecuación (6), considerando que el momento flector viene dado por $M_f = F \cdot L$.

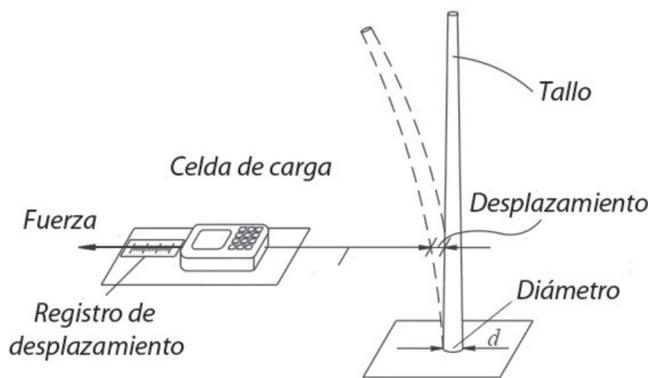


Figura 12. Esquema para prueba de flexión en voladizo.

Para realizar la prueba de flexión en voladizo se ha generado un equipo propio consistente en un carril deslizante sobre el cual se ha instalado una celda de carga de 50 N, acoplado a la celda de carga se instaló una placa de rebote para el sensor de desplazamiento ubicado al otro extremo del equipo. El carril deslizante es movido a 100 mm/min por un tornillo sin fin que es accionado por un motor de corriente continua. El tallo de quinua por su extremo inferior se sujeta en una prensa de banca y por medio de un anillo con una cuerda inflexible se sujeta el tallo de la quinua a la celda de carga. La altura de sujeción a partir de su base rígida es de 234 mm (figura 13).

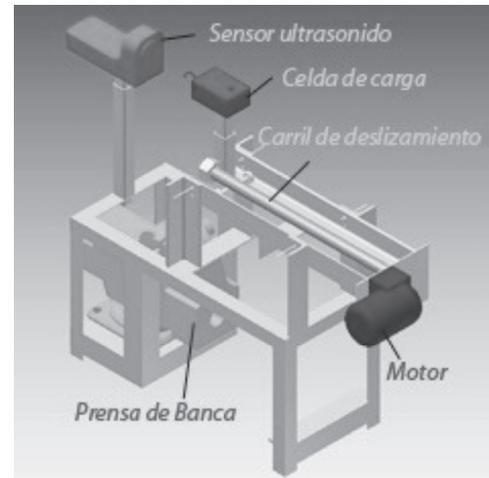


Figura 13. Esquema de la prueba de flexión en voladizo con sensor de ultrasonido.

Una vez colocado el tallo de quinua en la prensa y sujetado el cordón inextensible entre el tallo y la celda de carga, se inicia encendiendo el sensor de ultrasonido y luego el motor para dar desplazamiento, de esta manera, se tiene el registro de fuerza y desplazamiento en el tiempo. Estas lecturas conforme ecuación (5) nos permiten obtener el esfuerzo de flexión, así como el módulo de elasticidad conforme experimento realizado por (Esehaghbeygi et al. 2009). La obtención del área e inercia de sección se realizó por medio gráfico. La ventaja de esta configuración respecto a la de flexión en tres puntos, es que permite realizar las mediciones de flexión hasta la rotura con mayor libertad que en prueba anterior, habiendo registrados los datos para obtener las gráficas de fuerza vs desplazamiento, esfuerzo vs deformación unitaria, esfuerzo vs humedad y módulo vs humedad para los tres niveles de tallo.

3. RESULTADOS Y DISCUSIONES

Pruebas de corte

El procesamiento de datos de las pruebas de corte ha permitido generar la gráfica de esfuerzo cortante- contenido de humedad para cada sección del tallo, a la vez obtener valores promedio de la resistencia a corte del tallo; de esta forma, para la variedad "Kellu" o "Amarilla" se ha obteniendo

para la parte inferior un esfuerzo de corte de 4.82 MPa para un porcentaje promedio de humedad de 7.73%. En el segundo tramo, la parte media se ha obtenido un esfuerzo de 5.78 MPa para un porcentaje de humedad de 8.38%, y para la parte superior se tiene un esfuerzo de 7.58 MPa para un porcentaje de humedad de 8.85%. Se puede apreciar que la variación de resistencia del tallo en función del porcentaje de humedad (figura 14), evidenciando que cuando el tallo se encuentra más húmedo presenta mayor resistencia al corte. Para cada tramo se ha obtenido una ecuación exponencial que aproxima el comportamiento del mismo. Comportamiento semejante se ha obtenido en el tallo de girasol (Ínce et al. 2005), determinando que su esfuerzo cortante va de 0.95 MPa a 1.5 MPa con un contenido de humedad de 20% a 80%.

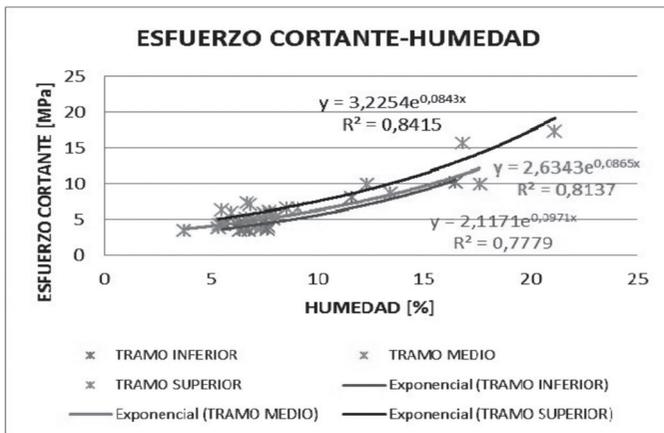


Figura 14. Esfuerzos cortantes vs contenido de humedad para las tres secciones del tallo de la quinua Kellu.

En el caso de la variedad Real Blanca, se han obtenido esfuerzos medios de 3.63 MPa, 4.675 MPa, 8.86 MPa para los tramos A, B y C respectivamente, sus porcentajes promedio de humedad fueron de 11.69 %, 10.38% y 9.23% para el mismo orden de tramos (figura 15). El valor máximo de la fuerza de corte se da en el tramo A con 759 N, aunque el valor de esfuerzo en este tramo es el menor, esto se debe a que el área de la parte inferior es el mayor de todo el tallo por cuanto se reporta un esfuerzo de corte menor; el mismo análisis pero a la inversa resulta para el tramo C, el cual tiene la fuerza de corte más pequeña 597 N, pero también presenta el área

transversal más reducida por cuanto el esfuerzo que se obtiene es el más alto.

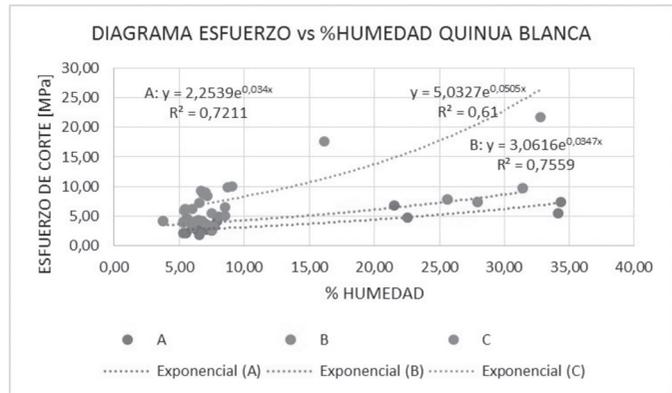


Figura 15. Esfuerzos cortantes vs contenido de humedad para las tres secciones del tallo de la quinua Real Blanca.

Los estudios realizados con la quinua negra (figura 16) muestran valores de fuerza algo inferiores a los de la variedad Real Blanca, más los valores de esfuerzo son mayores; esta divergencia se llega a explicar al analizar los áreas transversales de los tallos, el área promedio del tallos de la quinua Real Blanca es de 149.42 mm², mientras que el área promedio de la quinua negra es de 57.71 mm², existiendo una relación aproximada de tres veces un diámetro de otro, que coincide por ejemplo con la relación de esfuerzos cortantes de 8.86 MPa para la quinua Real Blanca y 26.78 MPa para la quinua negra.

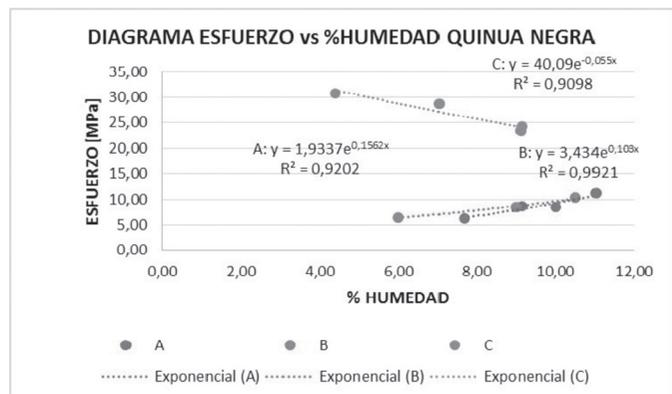


Figura 16. Esfuerzos cortantes vs contenido de humedad para las tres secciones del tallo de la quinua Negra.

Pruebas de flexión

Inicialmente se pudo apreciar dos etapas de comportamiento mecánico del tallo (Mohsenin 1986), la primera denota un comportamiento elástico con una línea de tendencia lineal y una pendiente pronunciada; posteriormente también se define otra tendencia lineal pero de pendiente más inclinada, llegando a evidenciar que se describe un punto de bio-fluencia. Los ensayos de flexión realizados con la variedad Kellu han generado gráficas muy semejantes a las mencionadas por Mohsenin, siendo que se tienen un punto de bio-fluencia a 12.49 MPa con un módulo de elasticidad de 19.22 GPa para el tramo A (figura 17), 7.60 MPa y 10.49 GPa para el tramo B y 11.04 MPa de esfuerzo de flexión con un módulo de elasticidad de 27.89 GPa para el tramo C.

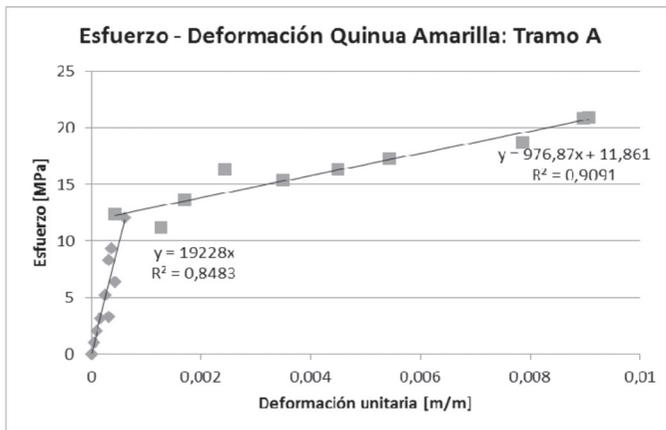


Figura 17. Gráfica de esfuerzo flector vs deformación unitaria del tramo A de la quinua Amarilla.

Realizando la gráfica de fuerza vs deformación longitudinal (figura 18) se aprecia la mayor resistencia que pone el tramo A a la flexión respecto de los otros tramos, a la vez se observa que desde cierto punto la pendiente se invierte por la falla estructural del tallo. Resultados semejantes obtuvo Galedar en sus ensayos con Alfa Alfa (Galedar et al. 2008).

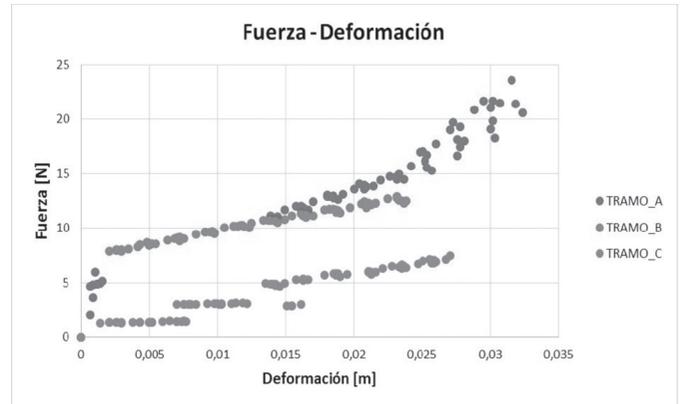


Figura 18. Gráfica de fuerzas flectoras vs desplazamiento para las tres secciones del tallo, quinua Kellu.

Como valores promedio del comportamiento mecánico del tallo de la quinua amarilla (Kellu), se tienen valores de esfuerzo de flexión de 11.93 MPa, 7.36 MPa y 10.02 MPa para los tramos A, B y C respectivamente y módulos de elasticidad de 21.93 GPa, 11.40 GPa y 27.79 GPa para el mismo orden de tramos.

En el caso de la Quinua Blanca, se ha tenido comportamiento semejante al de la quinua amarilla, habiendo determinado valores del punto de bio-fluencia de 10.26 MPa para el tramo A con un módulo de elasticidad de 8.70 GPa (figura 19). Para el segundo tramo se han determinado valores de bio-fluencia de 5.64 MPa para el tramo B con un módulo de elasticidad de 8.19 GPa. En el tercer tramo se han determinado valores de bio-fluencia de 29.37 MPa con un módulo de elasticidad de 20.24 GPa.

Estos resultados son bastante superiores a los encontrados en los tramos inferiores; la razón puede encontrarse en la presencia de nervaduras propias de la ramificación del tallo en el sector de la panoja que sirven de rigidizadores de la estructura.

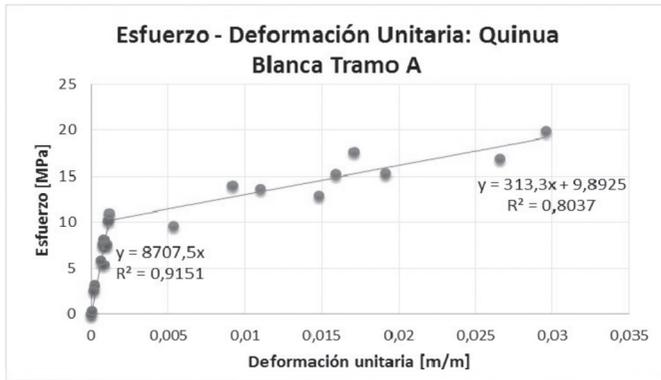


Figura 19. Gráfica de esfuerzo flector vs deformación unitaria del tramo A de la quinua Real Blanca.

Se ha obtenido la gráfica del módulo de elasticidad vs contenido de humedad, determinando un comportamiento descendente del módulo a medida que se incrementa la humedad (figura 20) comportamiento explicable dado que al incrementar la humedad se disminuye la rigidez del tallo bajando por tanto el valor del módulo. Resultados semejantes se obtuvieron en la caracterización mecánica de los tallos de girasol (Shahbazi et al. 2011).

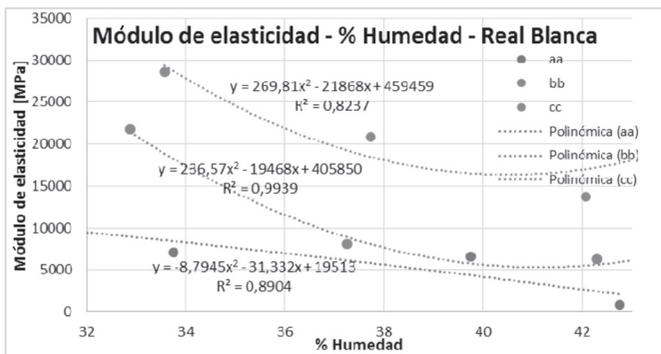


Figura 20. Gráfica de Módulos de elasticidad vs contenido de humedad para las tres secciones del tallo.

También se han obtenido los valores promedio de esfuerzo de flexión, módulo de elasticidad y porcentajes de humedad para los tres tramos, obteniendo para el

tramo A un esfuerzo flector de 8.95 MPa, módulo de elasticidad de 8.29 GPa para un contenido promedio de humedad de 34.98%; para el tramo B se tiene un esfuerzo flector de 6.56 MPa, módulo de elasticidad de 14.00 GPa para un contenido promedio de humedad de 40.37%, finalmente en el tramo C se ha encontrado un esfuerzo de 30.37 MPa, un módulo de elasticidad de 21.21 GPa para un contenido de humedad de 35.80%.

Los ensayos de propiedades mecánicas de la Quinua Negra, lanzan resultados de resistencia algo más altos que las variedades anteriores teniendo por ejemplo un punto de bio-fluencia de 15.23 MPa y un módulo de elasticidad de 23.07 GPa para el tramo A (figura 21).

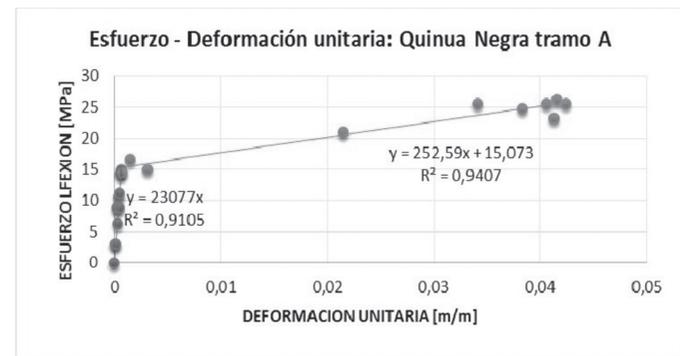


Figura 21. Gráfica de Módulos de elasticidad vs contenido de humedad para las tres secciones del tallo.

En el tramo B se tiene un esfuerzo de bio-fluencia de 7.66 MPa para un módulo de 8.738 GPa; para el tramo C el esfuerzo de bio-fluencia es de 25.02 MPa para un módulo de 29.37 GPa. Nuevamente se hace notar el incremento de resistencia del tramo C por presencia de nervaduras.

La figura 22 muestra la relación del módulo de elasticidad con el porcentaje de humedad para el tramo C, encontrando un comportamiento polinómico de segundo orden como en el caso de la variedad Real Blanca.

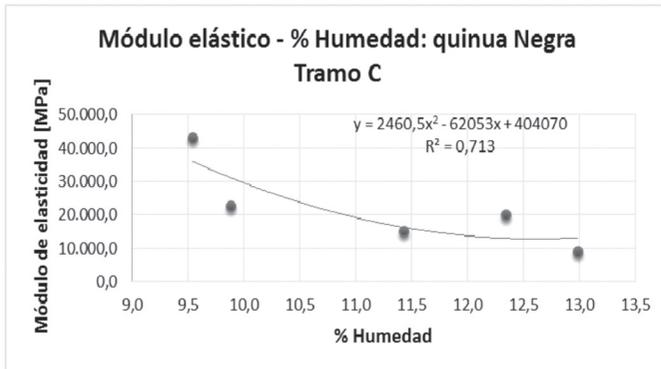


Figura 22. Gráfica de Módulos de elasticidad vs contenido de humedad para el tramo C del tallo.

Los valores promedio de esfuerzo de flexión, módulo de elasticidad y porcentajes de humedad para el tramo A fueron de 11.68 MPa, módulo de elasticidad de 17.69 GPa para un contenido promedio de humedad de 8.01%; para el tramo B se tiene un esfuerzo flector de 7.68 MPa, módulo de elasticidad de 7.80 GPa para un contenido promedio de humedad de 10.48%, finalmente en el tramo C se ha encontrado un esfuerzo de 47.55 MPa, un módulo de elasticidad de 29.37 GPa para un contenido de humedad de 11.03% .

4. CONCLUSIONES

- El comportamiento mecánico del tallo de la quinua a flexión varía de acuerdo al porcentaje de humedad, cuando el tallo de quinua tiene poca humedad se comporta de forma frágil llegando a la ruptura rápida con bajas sollicitaciones de fuerza, a medida que se incrementa el porcentaje de humedad el tallo de la quinua pasa a un comportamiento elástico, incrementando su resistencia y denotando la existencia de un punto de bio- fluencia. Cuando el contenido de humedad pasa el 35%, el tallo se comporta de forma flexible necesitando sollicitaciones menores para ser

doblado, encontrando así que a mayor porcentaje de humedad, menor resistencia del tallo a flexión.

- A flexión los tramos más resistentes han sido los de la parte superior, que si bien presentan secciones transversales más pequeñas, al ser la región donde se desarrolla la panoja, se encuentran varias nervaduras que actúan como rigidizadores estructurales.
- Se ha determinado que el módulo de elasticidad disminuye conforme se incrementa el porcentaje de humedad para los tres tipos de quinua ensayados.
- El porcentaje de humedad con el que se han realizado los ensayos esta entre los rangos de humedad de 15% a 45%.
- La resistencia a corte de la quinua va incrementando a medida que se incrementa el porcentaje de humedad, entendiéndose que las fibras del tallo pasan de ser quebradizas (quinua seca) a flexibles (quinua húmeda). Cuando la quinua esta seca la falla por corte se da al iniciarse la primera fisura, hecho que sucede rápidamente con el filo de la cuchilla, cuando la quinua está húmeda, las fibras se vuelven más elásticas deformándose antes de romperse.
- La quinua negra es la variedad que presenta mayor resistencia al corte, aunque los valores de fuerza cortante no son los más altos.
- La quinua Real Blanca presenta los valores medios de resistencia al corte, pero a la vez se han registrado para esta los valores más altos de fuerza cortante, pudiendo tomar estas como parámetro para el diseño de maquinaria de cosecha.

5. BIBLIOGRAFÍA

- Bright R and Kleis E., 1964. Mass shear strength of haylage. American Society of Agricultural and Biological Engineers, 7, pp.100–101.
- Chancellor, W.J., 1958. Energy requirements for cutting forage. Agricultural engineering, 39, pp.633–640.
- Chattopadhyay, P.S. & Pandey, K.P., 1999. Mechanical Properties of Sorghum Stalk in relation to Quasi-static Deformation. Journal of Agricultural Engineering Research, 73(2), pp.199–206.
- Esehaghbeygi, A. et al., 2009. Bending and Shearing Properties of Wheat Stem of Alvand Variety. Applied Sciences, 6(8), pp.1028–1032.
- Galedar et al., 2008. Bending and Shearing Characteristics of Alfalfa Stems 1. Journal Agricultural Engineering Research.
- Galedar, M.N. et al., 2009. Influence of moisture content, rate of loading and height regions on tensile strength of alfalfa stems. Sciences-New York, (1961), pp.27–30.
- Heidari, A., 2012. Influence of Knife Bevel Angle, Rate of Loading and Stalk Section on Some Engineering Parameters of Liliun Stalk. Iranica Journal of Energy & Environment, 3(4), pp.333–340.
- Igathinathane, C., Womac, A. R. & Sokhansanj, S., 2010. Corn stalk orientation effect on mechanical cutting. Biosystems Engineering, 107(2), pp.97–106.
- Ince, A. et al., 2005. Bending and Shearing Characteristics of Sunflower Stalk Residue. Biosystems Engineering, 92(2), pp.175–181.
- Mariuz Szymanek, 2007. Analysis of Cutting Process of Plant Material. Distribution, (1), pp.107–113.
- Mohsenin, N.N., 1986. Physical properties of plant and animal materials: structure, physical characteristics and mechanical properties Gordon et Breach, ed., New York [u.a.]: Gordon et Breach.
- Shahbazi, F., Galedar, M.N. & Mohtasebi, S.S., 2011. Physical properties of safflower stalk. International Agrophysics, 25, pp.281–286.
- Taghijarah, H. et al., 2011. Shearing characteristics of sugar cane (*Saccharum officinarum* L.) stalks as a function of the rate of the applied force. Australian Journal of Crop Science, 5(1835-2707), pp.630–634.
- Taghinezhad, J., Alimardani, R. & Jafari, A., 2013. Effect of moisture content and dimensional size on the shearing characteristics of sugarcane stalks. Journal of Agricultural Technology, 9(2), pp.281–294.
- Tavakoli, H., Mohtasebi, S.S. & Jafari, A., 2008. Effects of moisture content, internode position.
- LA PATRIA. 2009. “Taller de Mecánica Timtaá Apoya Proceso de Producción de Quinua.” Editorial LA PATRIA Ltda, September 21. <http://www.lapatriaenlinea.com/index.php/function.include%3Ft%3Daldo-gonzalez-bate-record-en-lanzamiento-de-bala%26nota%3D26853?t=taller-de-mecanica-timtaa-apoya-proceso-de-produccion-de-quinua¬a=2239>.