



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo
Integral Regional Unidad Oaxaca.

Maestría en Ciencias en Conservación y Aprovechamiento
de Recursos Naturales

(INGENIERÍA)

DETERMINACIÓN DEL COMPORTAMIENTO VISCOELÁSTICO Y
MODELO REOLÓGICO EN LAS FIBRAS DE HOJAS DEL *Agave*
angustifolia Haw.

T E S I S

Que para obtener el grado de:

Maestro en Ciencias

Presenta:

Luis Alberto Rios Santos

Director:

Dr. Magdaleno Caballero Caballero

Santa Cruz Xoxocotlán, Oax. Junio 2011.



INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL SECRETARIA DE INVESTIGACION Y POSGRADO

ACTA DE REVISION DE TESIS


En la Ciudad de Oaxaca de Juárez siendo las 13:00 horas del día 02 del mes de Junio del 2011 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación del **Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Unidad Oaxaca (CIIDIR-OAXACA)** para examinar la tesis de grado titulada: **"Determinación del comportamiento viscoelástico y modelo Reológico de las fibras de hojas de Agave angustifolia Haw"**


Ríos Apellido paterno	Santos materno	Luis Alberto nombre(s)
		Con registro: A 0 9 0 2 6 4


aspirante al grado de: **MAESTRÍA EN CIENCIAS EN CONSERVACIÓN Y APROVECHAMIENTO DE RECURSOS NATURALES**

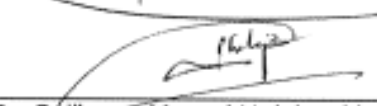
Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **SU APROBACION DE LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.


LA COMISION REVISORA
Director de tesis


Dr. Magdalena Caballero Caballero

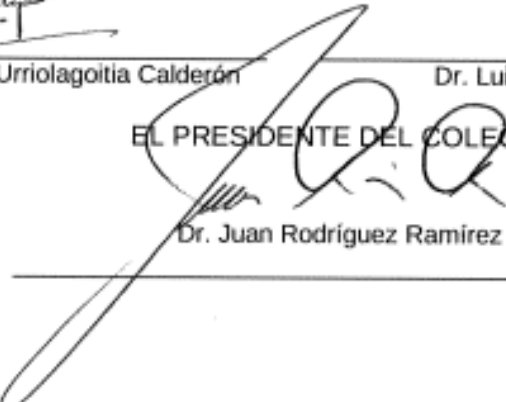
 Dr. Pastor Teodoro Matadamas Ortiz


 Dr. Juan Alejandro Vazquez Feijoo

 Dr. Guillermo Manuel Urriolagoitia Calderón

 Dr. Luis Héctor Hernández Gómez

EL PRESIDENTE DEL COLEGIO


Dr. Juan Rodríguez Ramirez


 CENTRO INTERDISCIPLINARIO
 DE INVESTIGACION PARA EL
 DESARROLLO INTEGRAL REGIONAL
 C.I.I.D.I.R.
 UNIDAD OAXACA
 IPN



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

CARTA CESION DE DERECHOS

En la Ciudad de Oaxaca de Juárez el día **02** del mes **junio del año 2011**, el (la) que suscribe **Ríos Santos Luis Alberto** alumno (a) del Programa de **MAESTRÍA EN CIENCIAS EN CONSERVACIÓN Y APROVECHAMIENTO DE RECURSOS NATURALES** con número de registro **A090264**, adscrito al Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Unidad Oaxaca, manifiesta que es autor (a) intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección de Dr. Magdaleno Caballero Caballero y cede los derechos del trabajo titulado: **“Determinación del comportamiento viscoelástico y modelo Reológico de las fibras de hojas de *Agave angustifolia* Haw”** al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación. Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección **Calle Hornos 1003, Santa Cruz Xoxocotlán, Oaxaca**, e-mail: posgradoax@ipn.mx ó luisbien_82@hotmail.com Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.



Luis Alberto Ríos Santos



CENTRO INTERDISCIPLINARIO
DE INVESTIGACIÓN PARA EL
DESARROLLO INTEGRAL REGIONAL
C.I.D.I.R.
UNIDAD OAXACA
IPN

RESUMEN

En el presente trabajo se determinaron las propiedades o atributos que caracterizan a las fibras extraídas de las hojas del *Agave angustifolia* Haw; área y la forma de la sección transversal, el comportamiento mecánico a tensión que identifica a las fibras del *Agave angustifolia* Haw. El procedimiento experimental inició con la extracción de las fibras de manera manual, después se midió la longitud de la fibra, posteriormente se realizó la medición del área de la sección transversal utilizando un microscopio óptico, con el apoyo de una cámara fotográfica acoplada al microscopio para tomar imágenes, y analizarlas con un programa de computo; posteriormente se realizaron las pruebas de resistencia a la tensión en fibras de agaves de 5, 7 y 9 años, en tres estratos del agave y en tres diferentes regiones de siembra. La resistencia a la tensión y el porcentaje de deformación de las fibras es mayor en agaves de 5 años. En pruebas de creep se ensayaron fibras de agaves de 5, 7 y 9 años, de tres regiones y de tres estratos del agave. Se observa un comportamiento a carga constante de 3 N a partir de los 180 segundos. Con estos resultados se concluye que el tipo de comportamiento mecánico que identifica a las fibras de las hojas del *Agave angustifolia* Haw es viscoelástico con una deformación permanente y una respuesta elástica las cuales se basan en un modelo de cuatro parámetros.

Palabras clave: fibras de las hojas del agave, viscoelástico, deformación permanente y respuesta elástica.

ABSTRACT

In the present study was to determine the properties and attributes that characterize the fibers extracted from the leaves of *Agave angustifolia* Haw, area and shape of the cross section, the mechanical tension that identifies the fibers of *Agave angustifolia* Haw. The experimental procedure began with the extraction of the fibers by hand, then measured the length of the fiber was subsequently measuring the area of the cross section using an optical microscope, with the support of a camera attached to microscope take pictures, and analyzed using a computer program, then were tested for resistance to stress fibers agaves 5, 7 and 9 years, in three layers of agave and in three different regions of planting. The tensile strength and percentage strain of agave fibers is higher in 5 years. In creep tests agave fibers were tested 5, 7 and 9 years in three regions and three layers of agave. Behavior is observed at constant load of 3 N after 180 seconds. With these results we conclude that the type of mechanical behavior that identifies the fibers from the leaves of *Agave angustifolia* Haw is permanent viscoelastic deformation and an elastic response which is based on a four-parameter model.

Keywords: fibers from the leaves of agave, viscoelastic deformation and elastic response.

AGRADECIMIENTOS

Al Instituto Politécnico Nacional, especialmente al Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional Unidad Oaxaca, por ser parte de mi formación académica.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, por el apoyo económico durante el desarrollo de la presente maestría.

Al Programa Institucional de Formación de Investigadores, por la beca otorgada a través de la participación en los proyectos de investigación del Dr. Magdaleno Caballero Caballero.

A los integrantes de la Comisión Revisora: Dr. Magdaleno Caballero Caballero, Dr. Luis Héctor Hernández Gómez, Dr. Guillermo Manuel Urriolagoitia Calderón, Dr. Pastor Teodoro Matadamas Ortiz y Dr. Juan Alejandro Vázquez Feijoo, por su tiempo y sus valiosos comentarios que enriquecieron este trabajo.

Al Dr. Magdaleno Caballero Caballero, al M. en C. José Luis Montes Bernabé y al M. en C. Luis Silva Santos, por darme un espacio para realizar mis actividades académicas y la oportunidad de participar en sus proyectos de investigación.

Al Laboratorio de Laboratorio de Alimentos del Centro de Investigación Interdisciplinaria para el Desarrollo Integral Regional Unidad Oaxaca del Instituto Politécnico Nacional, por las facilidades para llevar a cabo los ensayos de tensión en fibras, especialmente a la M. en C. Patricia Santiago García.

DEDICATORIA

A mis padres:

Por haberme
brindado su comprensión y
apoyo incondicional durante toda mi
maestría, por sus consejos que me orientaron
a tomar las mejores decisiones y por creer en mi.

A Dios:

Por permitirme vivir esta vida,
y aprender cosas nuevas.

A mis familiares y compañeros:

Que siempre han estado en los momentos
oportunos para brindarme su apoyo incondicional.

ÍNDICE GENERAL

INTRODUCCIÓN	1
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	2
JUSTIFICACIÓN	2
OBJETIVO GENERAL.....	4
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	4
HIPÓTESIS.....	4
CAPITULO 1. ANTECEDENTES.....	5
CAPITULO II. MARCO TEÓRICO	10
1.1 Reología.....	10
1.1.1 Definición de esfuerzo.	10
1.1.2 Definición de deformación.	11
1.1.3 Ley de Hooke generalizada.	12
1.1.4 Ley de Newton.	13
1.1.5 Viscoelasticidad.....	14
1.1.5.1 Métodos experimentales para la medida del comportamiento viscoelástico.	15
1.1.5.2 Modelos de comportamiento viscoelástico.....	16
1.1.6. Modelo Reológico del fenómeno de relajación.	20
CAPITULO III. METODOLOGÍA Y DESARROLLO EXPERIMENTAL	24
3.1.- Diseño del experimento.....	25
3.2.- Ubicación de los cultivos y selección de los agaves.	26
3.3.- Análisis del experimento.....	27
3.4 Caracterización física de las hojas.	29
3.5.- Proceso de extracción de las fibras por el método manual.....	30
3.6.- Caracterización física de las fibras: Peso, longitud y diámetro.	31
3.7.- Ensayos de resistencia última a la tensión.	33
3.8.- Ensayos para prueba de creep.....	33
3.9.- Texturómetro TA-XT2i para prueba de materiales.....	34
3.9.1.- Montaje y preparación de las probetas.....	37
CAPITULO IV. RESULTADOS	38
4.1. Análisis de RUT de todas las combinaciones.	38
4.2 Análisis de la RTU por factores.	39

4.3 Análisis de deformación.	41
4.4. Análisis de la deformación por factores.	43
CONCLUSIONES.....	47
REFERENCIAS.....	48
ANEXO 1.....	51
PARTICIPACIÓN EN FABRICACIÓN DE PROTOTIPOS Y EVENTOS ESTATALES.....	51
ANEXO 2.....	56
PARTICIPACIÓN EN EVENTOS NACIONALES.....	56
ANEXO 3.....	57
PARTICIPACIÓN EN EVENTOS INTERNACIONALES	57

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Resistencia última a la tensión en tres secciones de la fibra.....	6
Figura 2. Módulo de elasticidad en tres secciones de la fibra.	7
Figura 3. Porcentaje de deformación en tres secciones de la fibra.	7
Figura 4. Gráfica fuerza/tiempo en ensayos a fatiga de fibras de sisal.	8
Figura 5. Elementos del esfuerzo.	10
Figura 6. Componentes del esfuerzo.....	11
Figura 7. Elemento diferencial de volumen y deformación bajo tensión uniaxial.....	13
Figura 8. Evolución hacia un comportamiento elástico por el aumento en la velocidad de deformación.	14
Figura 9. Deformación frente al tiempo punto t1 corresponde al punto en el que se aplica el esfuerzo, siendo t2 el instante en el que se elimina.....	17
Figura. 11.- Elementos del modelo de maxwell.....	20
Figura 12. Curva esfuerzo / tiempo de las fibras naturales.	23
Figura 13. Diagrama metodológico.....	24
Figura 14. Niveles en el agave.	26
Figura 15. Dimensiones geométricas de las hojas.	29
Figura 16. Nomenclatura a utilizar en las hojas.....	29
Figura 17. Proceso de desfibrado.....	30
Figura 18. Texturómetro TA-XT2i/25.	34
Figura 19. Mordazas de cara plana.	35
Figura 20. Colocación de pesa de 5 kilogramos para calibración de celda de carga	36
Figura 21. Preparación de probetas.	37
Figura 22. RUT de las combinaciones de los factores región, edad y estrato.....	39
Figura 23. Resistencia de las fibras por regiones.....	40
Figura 24. Resistencia de fibras por edad de agaves.....	40
Figura 25. Comportamiento de RUT en los estratos	41
Figura 26. Deformación de la combinación de los factores región, edad y estrato.....	43
Figura 27. Deformación porcentual por regiones.....	43
Figura 28. Deformación porcentual por edades.....	44

Figura 29. Deformación porcentual por estratos.....	44
Figura 30. Relación de RUT y deformación en las combinaciones	45
Figura 31. Relación de RUT y deformación con respecto a las regiones	45
Figura 32. Relación de RUT y deformación con respecto a la edad de los agaves.....	46
Figura 33. Relación de RUT y deformación con respecto a los estratos.	46

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Resultados de ensayos a tensión en fibras de hojas de <i>Agave angustifolia</i> Haw a diferentes velocidades de deformación.....	8
Tabla 2. Resultados de ensayos a tensión en fibras de sisal a diferentes velocidades de deformación	8
Tabla 3. Resultados de ensayos a tensión en fibras de banana a diferentes velocidades de deformación	9
Tabla 4. Tratamientos obtenidos para los ensayos.	27
Tabla 5. Análisis de variancia para los ensayos de compresión en las hojas del <i>Agave angustifolia</i> Haw.....	28
Tabla 6. Equipo de medición para las dimensiones geométricas de las hojas.....	30
Tabla 7. Características de la balanza analítica.	32
Tabla 8. Características del microscopio.....	32
Tabla 9. Condiciones de ensayo para pruebas a tensión uniaxial.....	33
Tabla 10. Condiciones de ensayo para texturómetro.	34
Tabla 11. Características del equipo	35
Tabla 12. Resultados de RTU	38
Tabla 13. Deformación porcentual de las combinaciones.	42

INTRODUCCIÓN

El *Agave angustifolia* Haw es una de las 23 especies existentes en el estado de Oaxaca (SAGARPA, 2006), este alcanza su madurez entre los 7-10 años de edad. Su uso principal es en la producción de mezcal; en este proceso solo se aprovecha el 45% de la planta. El otro 55% de cada agave corresponde a las hojas las cuales no son aprovechadas (Silva, y Caballero, 2004). Para utilizar estas hojas que son consideradas como desperdicio, es necesario estudiarlas y determinar sus propiedades mecánicas, químicas, viscoelásticas, térmicas y morfológicas. Por lo cual se han realizado pruebas mecánicas en las fibras de las hojas del *Agave angustifolia* Haw, las cuales demostraron que con aumentar la velocidad de deformación en ensayos a tensión, la resistencia última a la tensión y el módulo de elasticidad aumentan (Silva et al., 2009). Pero cuando la velocidad de deformación es mayor a 200 mm/min, la resistencia última a la tensión decrece por lo cual en estas fibras se observa un comportamiento viscoelástico.

El comportamiento viscoelástico de los materiales forma parte del estudio de la Reología, para comprender la relación de elasticidad-viscosidad que presentan materiales como lo son las fibras naturales.

Los materiales viscoelásticos sometidos a tensión se caracterizan por tener propiedades de: un sólido elástico que se rige por la ley de Hooke, pero también la de un líquido viscoso que se fundamenta en ley de Newton (Ya, y Isayer, 2006). Para describir estas propiedades es necesario apoyarse en modelos matemáticos como lo son el modelo de Maxwell y de Voigt.

Este trabajo de investigación tiene como propósito ensayar fibras de hojas de *Agave angustifolia* Haw de 5, 7 y 9 años de edad, a través de pruebas de tensión uniaxial y relajación, para determinar las propiedades viscoelásticas y seleccionar el modelo Reológico que describa dicho comportamiento. Y en función de este conocimiento, ofrecer propuestas de aplicaciones donde se utilicen estas fibras.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La contaminación ambiental así como el cambio climático son consecuencia de la dependencia del petróleo, por lo que surge la necesidad de encontrar nuevos materiales para utilizarlos en la industria a nivel mundial y en especial en la fabricación de componentes para la industria automotriz. Como una alternativa de estos materiales, se ha propiciado a estudiar las fibras que se encuentran en las plantas vegetales como Sisal, Kenaf, Corteza de coco, Caraúa (Tomczak, Satyanarayana, y Demétrio, 2007) y *Agave angustifolia* Haw (Silva et al., 2009).

Dentro de las investigaciones realizadas a fibras naturales, se han determinado las propiedades mecánicas de las fibras de hojas del *Agave angustifolia* Haw por medio de una serie de ensayos a tensión; estas pruebas demostraron que las fibras tienen un comportamiento viscoelástico (Silva et al, 2009), similar a las fibras del Sisal (Mukherjee, y Satyanarayana, 1984), Kenaf (Ayre et al., 2009) y *Agave americana* (Oudiani et al., 2009). Dicho comportamiento corresponde a las propiedades de viscoelasticidad, viscosidad, relajación y tiempo de relajación; por formar parte de las propiedades reológicas de los vegetales (Mohsenin, 1986), las cuales no han sido estudiadas en las fibras de hojas del *Agave angustifolia* Haw, por lo tanto existe un problema de desconocimiento de dichas propiedades.

En el estado de Oaxaca se cultiva el *Agave angustifolia* Haw, este es utilizado en la industria del mezcal, durante su proceso en la etapa de corte que se lleva a cabo entre los 7 y 10 años de edad del agave; resultan como subproductos, bagazo y hojas que son desperdiciadas totalmente por lo que surge la necesidad de estudiarlas y utilizarlas en aplicaciones industriales. Estas hojas, de las cuales es posible extraer fibras (Silva, y Caballero, 2004) son causa de un proceso de investigación en el que se determinaron las propiedades mecánicas en fibras de las hojas de agaves de 8 años (Silva et al., 2009), y se determinarán las propiedades viscoelásticas de las fibras de hojas del *Agave angustifolia* Haw.

JUSTIFICACIÓN

Existe en la naturaleza una gran variedad de plantas vegetales como el sisal, henequén y lino; de donde son obtenidas fibras naturales, estas se encuentran en los tallos, hojas, raíces, frutos y semillas. Por lo tanto estos vegetales son aprovechados debido a su habilidad para formar

fibras (Rao, 2007) con características de; baratas, fuertes, ligeras, renovables y amigables con el medio ambiente (Gomes, Goda, y Ohgi, 2004).

Desde el punto de vista del sector agrícola, en la etapa de cosecha de los vegetales el aprovechamiento de fibras de las hojas es visto como una pérdida, pero a partir de la innovación tecnológica en la investigación, las fibras se analizan como materia prima que puede ser transformada en productos provechosos. En este sentido se estudian como materiales compuestos (Justiz-Smith, 2007).

El sector agrícola del Estado de Oaxaca cuenta con una superficie de 15,442.00, hectáreas sembradas que corresponden al cultivo del vegetal *Agave angustifolia* Haw (SAGARPA, 2009). En una hectárea se cosechan 2 500 agaves de los cuales se genera en promedio 250 toneladas como desperdicio, esto como resultado del aprovechamiento industrial del Agave para la producción de mezcal. En este proceso que inicia con el corte de la piña, la floración es indicador inequívoco de que el ciclo de vida de la planta está por terminar, es un síntoma de su madurez y el cambio objetivo más significativo. Las hojas son tiradas en los campos de cultivo y por lo tanto desaprovechadas, ésta pérdida es muy significativa para los productores, ya que representa el 55% del peso total de la planta. Este desperdicio de las hojas que representa a más de la mitad del agave, es la razón por la cual existe un potencial aproximado de 17 000 toneladas de fibras al año en el estado de Oaxaca (Silva, y Caballero, 2004).

Para que las fibras de las hojas del *Agave angustifolia* Haw, sean utilizadas en aplicaciones industriales como; textiles tecnológicos, geotextiles, pulpa-papel y material de refuerzo en compuestos para la fabricación de nuevos artículos, o en componentes de automóviles, es necesario conocer el comportamiento viscoelástico de las fibras así como su modelo Reológico.

Para determinar las propiedades viscoelásticas y encontrar los parámetros físico-mecánicos en las fibras de hojas de *Agave angustifolia* Haw, se aplicarán las pruebas de relajación de lo que resultará un comportamiento viscoelástico, que se describirá por medio del modelo Reológico de Maxwell. Y con el conocimiento de sus propiedades físico-mecánicas de estas fibras se ofrecerán propuestas en la fabricación de nuevos artículos.

OBJETIVO GENERAL

- Determinar el comportamiento viscoelástico de las fibras de las hojas del *Agave angustifolia* Haw, a través de la experimentación y modelo Reológico.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar la propiedad de resistencia última a la tensión de las fibras de hojas del *Agave angustifolia* Haw.
- Determinar la propiedad de recuperación elástica, deformación parcial y permanente en las fibras de hojas de *Agave angustifolia* Haw a través de las pruebas de relajación.
- Seleccionar el modelo Reológico del comportamiento viscoelástico en las fibras de hojas del *Agave angustifolia* Haw.

HIPÓTESIS

1.- las propiedades de recuperación elástica, deformación permanente y elongación de las fibras de hojas del *agave angustifolia* haw, están en función del tiempo de madurez del agave.

2.- El comportamiento viscoelástico de las fibras de las hojas del *Agave angustifolia* Haw, se describe a través del modelo de Maxwell.

CAPITULO 1. ANTECEDENTES.

Una fibra natural es formada en un tejido vegetal o animal y se define como un hilo o filamento de longitud muy grande comparada con su anchura (Justiz et al., 2007). Para clasificarlas estas se pueden dividir en tres grupos: las fibras vegetales como el sisal, henequén y lino; fibras proteínicas como lana, seda, y fibras minerales como los asbestos (Bodros, y Baley, 2007).

En una fibra vegetal la eficiencia del reforzamiento está relacionada con el contenido de sus principales constituyentes como la celulosa, hemicelulosa, lignina, pectina y cera. La celulosa forma una estructura microcristalina, en la que se alojan regiones cristalinas y amorfas, este constituyente tiene características de resistencia al álcali y resistencia a los agentes oxidantes. En la hemicelulosa se forma el sustento de la matriz para las microfibrillas de la celulosa, tiene como característica que es hidrolizable en ácidos y tiene solubilidad en álcali. La lignina es totalmente amorfa e hidrófoba, no es hidrolizable en ácidos y se óxida rápidamente (Jacob, y Thomas, 2007); es debido a estos constituyentes que las biofibras tienen un peso ligero, por lo tanto son usadas en compuestos para disminuir los niveles de ruido, como aislantes térmicos y en componentes de automóviles (Reddy, y Yang, 2005).

Por lo anterior es importante estudiar las propiedades mecánicas, térmicas, morfológicas, químicas y reológicas de las fibras naturales. Así el antecedente inmediato para el estudio de las propiedades reológicas es el comportamiento mecánico de las fibras, influido por factores como variación de diámetro, longitud y velocidad de deformación.

En estudios realizados a fibras de Carauá al aumentar el diámetro de 26 μm a 64 μm afecta a las propiedades mecánicas de; la resistencia última a la tensión y módulo de Young ya que decrecen de 310 Mpa a 131 Mpa, y 96.1 Gpa a 30 Gpa respectivamente (Tomczak, y Demétrio, 2007). Pero Mukherjee y Satyanarayana (1884) demostraron un caso contrario, por que cuando el diámetro de las fibras de sisal aumentan de 0.1 mm a 0.3 mm las propiedades mecánicas de: resistencia última a la tensión y el módulo de Young aumentan de 530 Mpa a 630 Mpa, y 17 Gpa a 22 Gpa respectivamente.

En cuanto a la variación de la longitud, Tomczak y Demétrio (2007) demostraron que en las fibras de caraúa con un diámetro principal de 46 μm y una velocidad de deformación de 5 mm/min, al aumentar la longitud de 5 mm a 25 mm; las propiedades mecánicas de: resistencia última a la tensión decrece de 223 Mpa a 173 Mpa y el Módulo de Young presenta una conducta contraria e incrementa de 26.6 Gpa a 52.9 Gpa.

En caso parecido Mukherjee y Satyanarayana (1984) demostraron, que existe una conducta similar en fibras de sisal con un diámetro principal de 200 μm y una velocidad de deformación de

10 mm/min, al aumentar la longitud de 15 a 65 mm; las propiedades mecánicas de; resistencia última a la tensión decrece de 793.80 Mpa a 620.81 Mpa y el módulo de Young aumenta de 14.15 Gpa a 25.36 Gpa respectivamente.

Para el estudio de las propiedades mecánicas de las fibras de *Agave angustifolia* Haw, se realizaron bajo las siguientes condiciones: longitud entre mordazas 350 mm, velocidad de deformación 5 mm/min y carga máxima 2 kg (Silva et al., 2009).

En la figura 1 se muestra la gráfica de las tres secciones de la fibra, la parte de la base, el centro y la punta; y empleando el Sistema Internacional de Unidades y el área calculada en cada una de las secciones de la fibra, se encontró el siguiente comportamiento: la base tiene en promedio una resistencia última a la tensión de 196 MPa, el centro 322 MPa y la punta 369 MPa, presentándose la menor variación en el centro de la fibra.

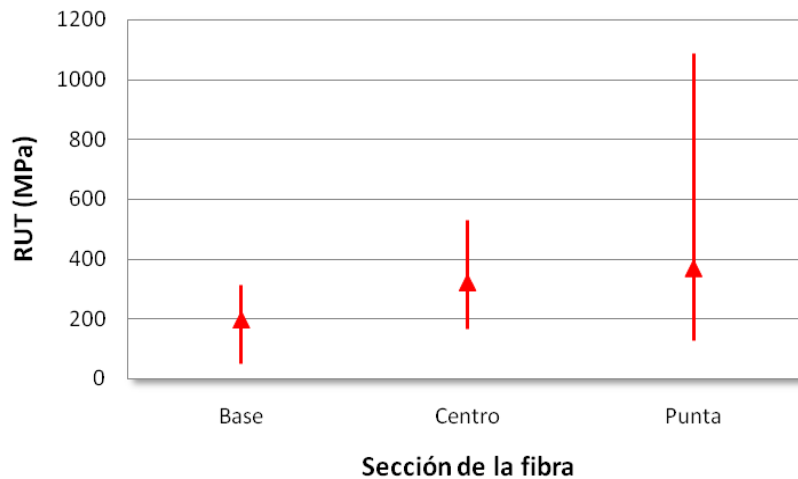


Figura 1. Resistencia última a la tensión en tres secciones de la fibra.

En la figura 2, se muestra el módulo de elasticidad, la sección de la base alcanzó un valor de 11 GPa, el centro 18 GPa y la punta 25 GPa, el coeficiente de variación es menor en el centro de la fibra.

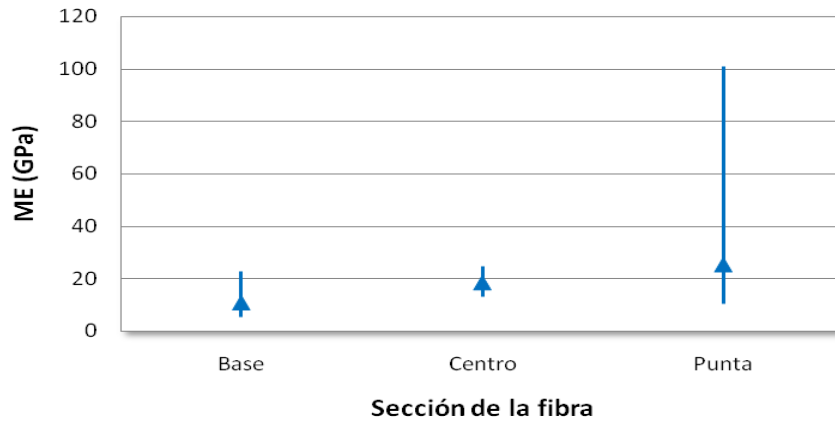


Figura 2. Módulo de elasticidad en tres secciones de la fibra.

La figura 3 muestra el porcentaje de deformación, el cual es mayor en la base con 2.37% seguido de la punta con 1.93% y el centro con 0.8%, presentando menor variación en el centro de la fibra.

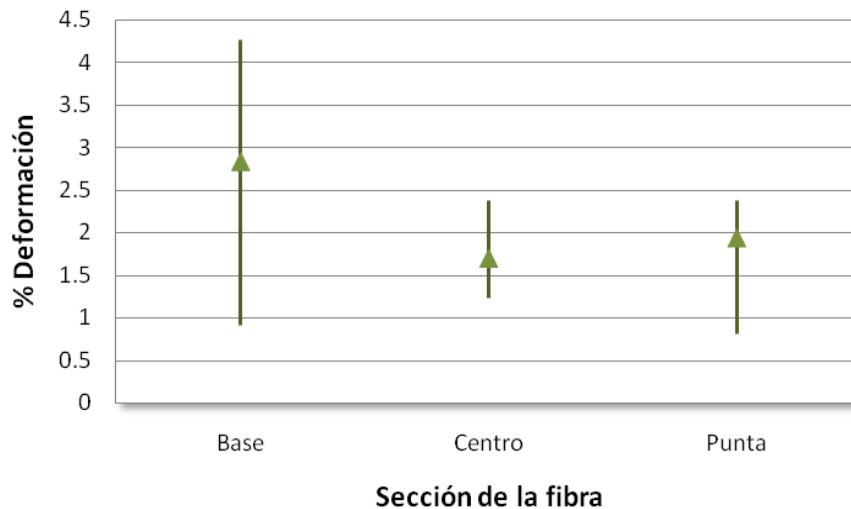


Figura 3. Porcentaje de deformación en tres secciones de la fibra.

Así mismo, Silva (2009) demostró que en fibras de hojas del *Agave angustifolia* Haw, al aumentar la velocidad de deformación de 1 a 200 mm/min las propiedades mecánicas de: resistencia última a la tensión y el módulo de Young incrementan de 216 a 362 MPa y 12 a 24 GPa respectivamente como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Resultados de ensayos a tensión en fibras de hojas de *Agave angustifolia* Haw a diferentes velocidades de deformación

V (mm/min)	RUT (MPa)	ME (GPa)
1	216.85	12.73
5	323.49	18.60
50	354.91	16.08
200	362.76	24.10

Fuente: López, 2008

Mukherjee y Satyanarayana (1984) demostraron en fibras de sisal que, al aumentar la velocidad de deformación de 1 a 50 mm/min las propiedades mecánicas de: la resistencia última a la tensión y el módulo de Young se incrementan de 481 MPa a 759.79 MPa y 8.41 GPa a 34.16 GPa respectivamente. Pero al aumentar la velocidad de deformación de 50 a 500 mm/min la resistencia última a la tensión decrece a 441.60 MPa como se muestra en la tabla 2.

Tabla 2. Resultados de ensayos a tensión en fibras de sisal a diferentes velocidades de deformación

V (mm/min)	RUT (MPa)	ME (GPa)
1	481.00	8.41
2	608.80	20
10	630.12	22.16
50	759.70	34.16
500	441.60	-

Fuente: Mukherjee y Satyanarayana, 1984

Además estudios recientes realizados a fibras de sisal muestran diferentes niveles de esfuerzo: 80, 160, 240, 320 y 400 MPa a los que fueron ensayados a fatiga, para obtener una gráfica de fuerza / tiempo como se muestra en la figura 4 (Flavio et al., 2009).

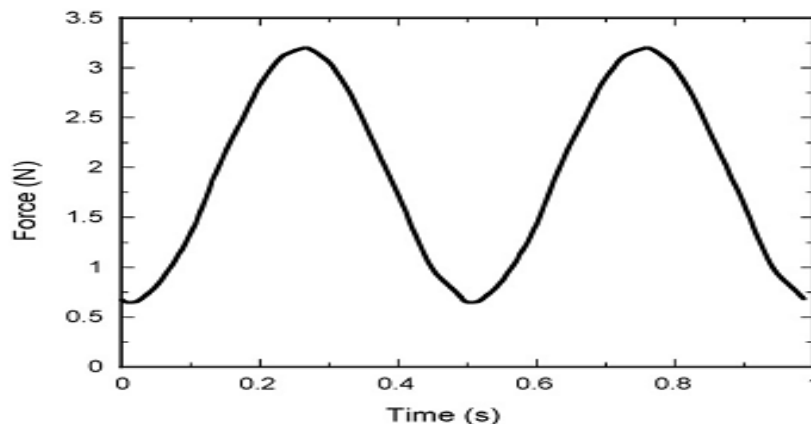


Figura 4. Gráfica fuerza/tiempo en ensayos a fatiga de fibras de sisal.

Fuente: Flavio et al., 2009

En otros estudios de reciente experimentación realizados a Agave americana, ensayaron fibras a tensión uniaxial, trabajaron sobre recuperación elástica y conducta viscoelástica (Oudiani et al., 2009).

Kulkarni y Satyanarayana (1983) demostraron que al ensayar fibras de banana; Al aumentar la velocidad de deformación de 1 a 100 mm/min, la resistencia última a la tensión incrementa de 726.723 MPa a 906.644 MPa como se muestra en la tabla 3, pero cuando la velocidad de deformación aumenta de 100 a 200 mm/min la resistencia última a la tensión decrece a 737.543 MPa.

Tabla 3. Resultados de ensayos a tensión en fibras de banana a diferentes velocidades de deformación

V (mm/min)	RUT (MPa)
0.5	726.723
20	789.289
100	906.644
200	737.543
500	806.719

Fuente: Kulkarni, 1983.

El comportamiento mecánico que muestran las fibras en pruebas a tensión uniaxial, es una manifestación simultánea de flujo viscoso y elástico, fenómeno denominado viscoelasticidad. Cuanto más resistente a la ruptura es la estructura más pronunciada es su elasticidad, y cuando más fácil se rompa mayor es su comportamiento viscoso. Por lo tanto, cuando se aumenta la velocidad de deformación la fibra se comporta como un cuerpo elástico a semejanza de un resorte, ocasionando un incremento en la resistencia última a la tensión y en el módulo de elasticidad. Cuando la velocidad de deformación disminuye se comporta como un cuerpo viscoso, lo que ocasiona una disminución en los valores del módulo de elasticidad y la resistencia última a la tensión.

Por lo tanto las propiedades mecánicas pueden definirse como aquellas que tienen que ver con el comportamiento de los materiales en virtud de las fuerzas aplicadas. Así, cuando la acción de las fuerzas da como resultado deformación y flujo de material, las propiedades mecánicas pueden ser referidas como propiedades reológicas (Tabilo, y Barbosa, 2005).

CAPITULO II. MARCO TEÓRICO

1.1 Reología.

La Reología es la ciencia del flujo que estudia la deformación de un cuerpo sometido a esfuerzos externos (Ya et al., 2006).

En 1678 Robert Hooke fue el primero que habló de la Reología en su libro “Verdadera teoría de la Elasticidad”. Dicha teoría se resumía en lo siguiente: “Si se dobla la tensión, se dobla deformación”. Para describir la reología es necesario apoyarse de los conceptos de esfuerzo, deformación, ley de Hooke y ley de Newton

1.1.1 Definición de esfuerzo.

El esfuerzo es la magnitud de la reacción interna producida en un sólido bajo la acción de una carga externa expresada en ecuación 1 (González, y González, 1999).

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad \text{Ecuación 1}$$

σ = Esfuerzo (N/m²)

F = Fuerza (N)

A = Área (m²)

En la figura 5 se muestra, la fuerza interna en un sólido que afecta el estado de los enlaces que mantienen unidas a las partículas del sólido, manifestándose de esta manera la reacción física.

El esfuerzo, es la medida del efecto de una fuerza externa en el interior de un cuerpo, dicho efecto es por lo tanto, una fuerza interna que atraviesa un área interna.

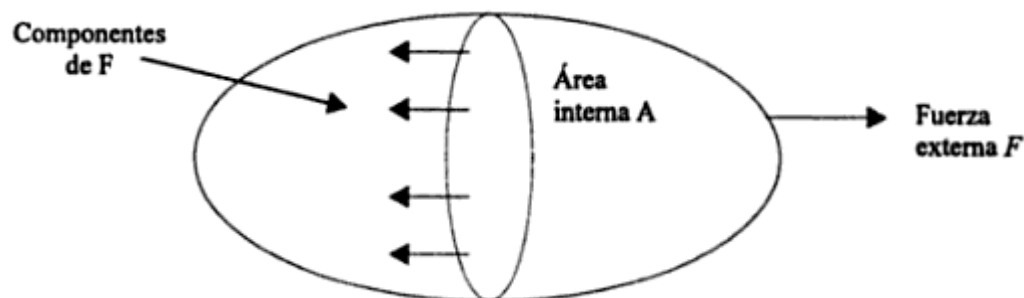


Figura 5. Elementos del esfuerzo.

Fuente: González, 1999

Una fuerza cualquiera puede ser separada en dos componentes: una componente perpendicular o normal F_n y una componente paralela o tangencial F_t . La figura 6 muestra los efectos de la acción de estas fuerzas sobre la superficie, y como son diferentes los esfuerzos también lo son.

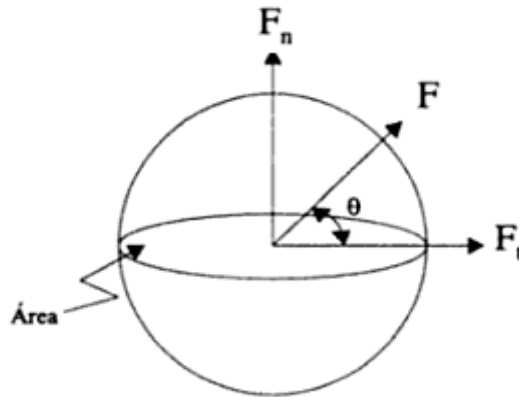


Figura 6. Componentes del esfuerzo

Fuente: González, 1999

Así, el esfuerzo producido por una fuerza normal, es llamado esfuerzo normal σ_N , y el esfuerzo producido por una fuerza tangencial es llamado es esfuerzo cortante τ (González et al., 1999).

1.1.2 Definición de deformación.

La deformación se define como el cambio de forma de un cuerpo debido a la acción de un esfuerzo. El cambio de forma implica el desplazamiento de puntos dentro del sólido.

La deformación como un alargamiento relativo, es alargamiento/longitud inicial, entonces la deformación por alargamiento se puede expresar por la ecuación 2:

$$\epsilon_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x} \text{ Ecuación 2}$$

ϵ_{xx} = Deformación en dirección x (%)

∂u = Desplazamiento en x (m)

En la deformación, el alargamiento en una dirección es independiente de como se esté alargado un cuerpo en las otras direcciones, entonces:

Si dv es el desplazamiento en y de la ecuación 3, entonces dw el desplazamiento en z de la ecuación 4.

$$\epsilon_{yy} = \frac{\partial v}{\partial y} \quad \text{Ecuación 3}$$

$$\epsilon_{zz} = \frac{\partial w}{\partial z} \quad \text{Ecuación 4}$$

ϵ_{yy} = deformación en dirección y (%)

ϵ_{zz} = deformación en dirección z (%)

∂v = desplazamiento en y (m)

∂w = desplazamiento en z (m)

1.1.3 Ley de Hooke generalizada.

Todo cuerpo se deforma bajo la acción de las fuerzas aplicadas y al cesar estas, el cuerpo tiende a recuperar su forma primitiva. Esta tendencia que, en mayor o menor grado tienen todos los cuerpos se denomina elasticidad.

En realidad, los cuerpos no son ni perfectamente elásticos ni perfectamente inelásticos. Las deformaciones que en ellos se producen constan de una parte de deformación elástica, que desaparece al cesar las fuerzas aplicadas y una parte de deformación permanente se mantiene posteriormente.

La ley de Hooke establece la proporcionalidad entre fuerzas y desplazamientos, a la relación existente entre tensiones y deformaciones actuantes en un punto; los coeficientes de proporcionalidad que aparecen son constantes característicos del material, y no dependen de la geometría del cuerpo, ya que el estado tensional y la deformación son propios de un punto como se muestra en la figura 7 (Cervera, 2001).

La ecuación 5 expresa la ley de Hooke:

$$\epsilon = \frac{\sigma E}{E} \quad \text{Ecuación 5}$$

ϵ = Deformación (%)

σ_E = Esfuerzo de tensión (N/m²)

E = Módulo elástico (MPa)

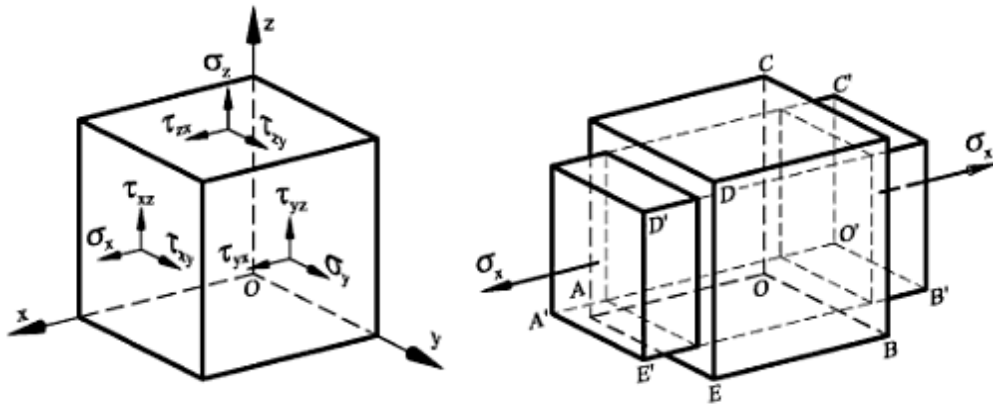


Figura 7. Elemento diferencial de volumen y deformación bajo tensión uniaxial.

Fuente: Cervera, 2001.

1.1.4 Ley de Newton.

En 1687 Isaac Newton publicó en “Philosophiae Naturalis Principia Mathematica” una hipótesis asociada al estado simple de cizalladura (o corte): “La resistencia derivada de la falta de deslizamiento de las partes de un líquido es proporcional a la velocidad con que se separan unas de otras dentro de él”. Esta necesidad de deslizamiento es lo que ahora se denomina “Viscosidad”, sinónimo de fricción interna. Dicha viscosidad es una medida de la resistencia a fluir, expresada en ecuación 6 (Bird, Armstrong, y Hassage, 1987).

$$\tau = \eta * w \quad \text{Ecuación 6}$$

τ = Esfuerzo cortante (Pa).

H = Viscosidad dinámica (Pa·s)

w = Velocidad de deformación (s⁻¹)

1.1.5 Viscoelasticidad.

En el caso de materiales viscoelásticos, una de sus características más importantes es la dependencia del tiempo de la respuesta a ciertos esfuerzos y deformaciones. Consecuentemente, es necesaria la inclusión del tiempo como una variable independiente para definir adecuadamente sus propiedades viscoelásticas. De hecho, cuando se mide el comportamiento reológico de estos materiales en un intervalo de esfuerzos o deformaciones se pueden encontrar dos grandes grupos: aquellos considerados como viscoelásticos lineales, en los cuales las propiedades viscoelásticas son una función del tiempo y no de la magnitud de la deformación, ni de la velocidad de deformación. Otra clase de materiales viscoelásticos son los no lineales. Éstos exhiben propiedades mecánicas que son una función no sólo del tiempo, sino de la magnitud del esfuerzo aplicado (Nuñez, Mendez, y Solorza, 2001).

Debido a la naturaleza viscoelástica de cada material, la magnitud de la tensión desarrollada no es sólo función de la deformación, sino también de la velocidad impuesta. La aplicación de distintas velocidades de deformación afecta significativamente la respuesta mecánica del material. En general a mayor velocidad de deformación la tensión originada es mayor, como se observa en la figura 8. Teóricamente, existe un límite para el efecto de la velocidad: a altas velocidades de deformación, la tensión originada depende principalmente del componente elástico, ya que las estructuras internas del material no se relajan.

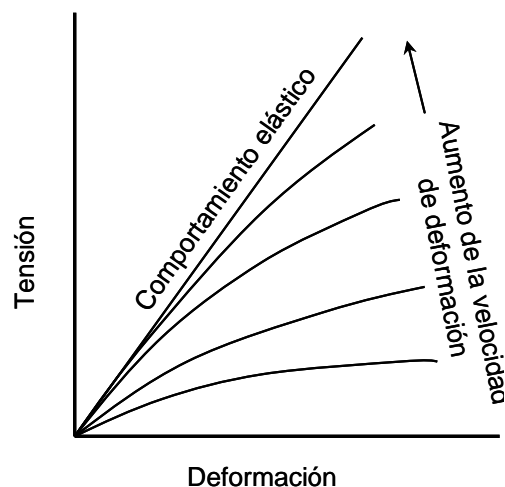


Figura 8. Evolución hacia un comportamiento elástico por el aumento en la velocidad de deformación.
Fuente: Nuñez Mendez, y Solorza 2001.

Cuando se estira o deforma un sólido, la energía elástica se almacena en los enlaces estirados, lo que proporciona al material la posibilidad de recuperar su forma original una vez que la causa de la deformación ha cesado. En contraste, cuando se aplica un esfuerzo de cizalla a un fluido newtoniano, la energía se disipa inmediatamente como consecuencia del propio flujo. Al cesar el esfuerzo aplicado no hay lugar para una recuperación elástica. En cierta medida todos los materiales son viscoelásticos, mostrando algún tipo de comportamiento intermedio entre estos dos polos, aunque los fenómenos viscoelásticos son particularmente aparentes en el caso de los polímeros. Al considerar un material polimérico, sujeto a un proceso que le haga fluir o deformarse irreversiblemente. Tal proceso puede necesitar años para ser observable y va a ser dependiente no sólo de la estructura química y la morfología del polímero, sino también de la magnitud del esfuerzo aplicado (Painter, Coleman, y Irwin, 1996).

1.1.5.1 Métodos experimentales para la medida del comportamiento viscoelástico.

En el experimento creep o fluencia bajo carga, se somete la muestra a un esfuerzo constante y se mide la deformación en función del tiempo. Un sólido perfectamente elástico debería deformarse instantáneamente en una cantidad, dada por la ley de Hooke. En un sólido viscoelástico la deformación cambiará con el tiempo. Se considera como ejemplo un experimento clásico, llevado a cabo con acetato de celulosa hace más de 50 años. La deformación, medida en porcentaje de alargamiento, graficada en función del tiempo. Para esfuerzos o cargas del orden de mil psi, la respuesta no es muy grande, aunque crece dramáticamente al ir incrementando la carga. La escala de tiempos que se tiene del experimento es de 7000 horas, casi un año. Lo que el experimento demostró es que si usa el polímero en una aplicación técnica donde sus dimensiones deben permanecer dentro de unos ciertos límites durante su estimado tiempo de vida, se debe tener en cuenta su respuesta en experimentos (Painter et al., 1996).

En el método de la relajación de esfuerzo, la deformación es la constante que se mantiene y el esfuerzo es medido como una función de tiempo. Al comienzo del experimento, la deformación es introducida y permite una fuerte elasticidad al estirar la muestra hasta el punto alcanzado, después se le retira la fuerza y aparece una deformación permanente.

1.1.5.2 Modelos de comportamiento viscoelástico.

El comportamiento elástico desde el punto de vista de la ley de Hooke y el comportamiento en flujo usando la ley de Newton. Se trata de relaciones inexactas pero, para sólidos y fluidos simples, funcionan bien para emplearse en el diseño ingenieril. Es posible combinar esas leyes para dar lugar a una descripción del comportamiento viscoelástico.

Al aplicar un cierto esfuerzo a un muelle hipotéticamente perfecto, éste se deformará instantáneamente en una cantidad que dependerá del módulo que se adscriba a ese muelle. La deformación producida se mantendrá hasta que el esfuerzo que la originó desaparezca, momento en el que el muelle volverá instantáneamente a sus dimensiones originales, como se observa en la figura 9. Por el contrario, el amortiguador mostrará un comportamiento perfectamente viscoso, de manera que la deformación crecerá con el tiempo de forma lineal tal como se muestra en la ecuación 7.

$$\frac{d\epsilon}{dt} = \frac{\sigma}{\eta} \quad \text{Ecuación 7}$$

$d\epsilon$ = Diferencial de la deformación (%)

dt = Diferencial del tiempo (s)

σ = Esfuerzo (N/m²)

η = Viscosidad (Pa·s)

Al eliminar el esfuerzo, el pistón del amortiguador permanecerá en la misma posición, sin volver hacia su posición original, de manera que se tienen deformaciones permanentes que dependen de la escala de tiempos del experimento.

El modelo de Maxwell muestra un comportamiento de deformación ilustrado en la figura 9, donde el muelle se deforma instantáneamente, seguido por una deformación lineal del amortiguador a lo largo del tiempo. Cuando el esfuerzo cesa, el muelle recupera instantáneamente sus dimensiones originales mientras que el amortiguador no lo hace, proporcionando así al conjunto una deformación permanente.

El modelo de Maxwell proporciona una representación cuantitativa y precisa de las propiedades viscoelásticas lo que permite una buena aproximación (Painter et al., 1996).

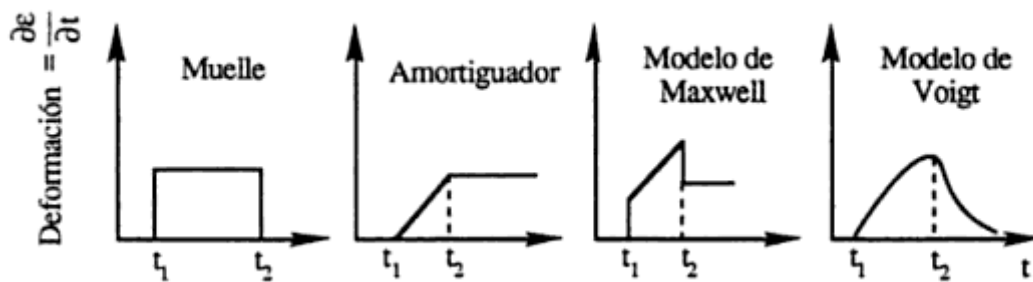


Figura 9. Deformación frente al tiempo punto t1 corresponde al punto en el que se aplica el esfuerzo, siendo t2 el instante en el que se elimina.

Fuente: Painter et al., 1996

El modelo de Voigt observado en la figura 9, combina en paralelo los mecanismos de muelle y amortiguador. Dichos elementos se encuentran conectados por medio de barras perfectamente rígidas, de forma que la deformación en ambos elementos sea idéntica; si el muelle se estira una cantidad ϵ , lo mismo debe hacer el amortiguador. Este modelo representa un tipo de comportamiento elástico retardado. Cuando se aplica el esfuerzo, el muelle quiere deformarse instantáneamente pero se encuentra impedido por efecto de su conexión con el amortiguador. De forma similar, cuando se elimina la carga, el muelle quiere volver de forma inmediata a sus dimensiones originales pero, de nuevo, no puede hacerlo porque está empujando al amortiguador que le hace retrasarse. Matemáticamente en la ecuación 8 esto puede expresarse, que la deformación o las velocidades de deformación en ambos elementos es la misma y que el esfuerzo total aplicado al sistema debe ser la suma de los esfuerzos en cada uno de los elementos (Painter et al., 1996).

$$\sigma(t) = E\epsilon(t) + \eta \frac{d\epsilon(t)}{dt} \quad \text{Ecuación 8}$$

$\sigma(t)$ = Esfuerzo en función del tiempo (N/m²)

E = módulo elástico (MPa)

$\epsilon(t)$ = Deformación en función del tiempo (%)

η = viscosidad (Pa·s)

$d\epsilon(t)$ = Diferencial de la deformación en función del tiempo (%)

$d(t)$ = Diferencial del tiempo (s)

En los experimentos de fluencia bajo carga o creep el esfuerzo σ_0 , es constante, de forma que en la ecuación 9:

$$\frac{d\epsilon(t)}{dt} + \frac{\epsilon(t)}{\tau_t} = \frac{\sigma_0}{\eta} \quad \text{Ecuación 9}$$

$d\epsilon(t)$ = Diferencial de la deformación en función del tiempo (%)

$d(t)$ = Diferencial del tiempo (s)

$\epsilon(t)$ = Deformación en función del tiempo (%)

τ_t = Tiempo de relajación (s)

σ_0 = Esfuerzo constante (N/m²)

η = Viscosidad (Pa·s)

Se sustituye el tiempo de relajación τ_t por η/E . Esto proporciona una ecuación diferencial lineal que tiene por solución la ecuación 10:

$$\epsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E} (1 - e^{-t/\tau_t}) \quad \text{Ecuación 10}$$

$\epsilon(t)$ = Deformación en función del tiempo (%)

σ_0 = Esfuerzo constante (N/m²)

E = Módulo elástico (MPa)

t = Tiempo (s)

τ_t = Tiempo de relajación (s)

Esta ecuación proporciona representaciones de la deformación en función del tiempo con forma exponencial, como las ya mostradas en la figura 9. La deformación se aproxima a su valor máximo σ_0/E a una velocidad que depende de τ_t y comienza a disminuir exponencialmente desde ese valor a lo largo del tiempo a partir de la eliminación del esfuerzo.

En experimentos de fluencia bajo carga o creep existe una respuesta elástica retardada, pero existe también una deformación permanente.

Los experimentos de relajación de esfuerzo requieren que la muestra se deforme instantáneamente al inicio del experimento. El amortiguador en serie con el muelle impide tal tipo de deformación instantánea (Painter et al., 1996).

La desventaja del modelo de Maxwell es que, no tiene en cuenta el componente elástico retardado de un experimento de fluencia bajo carga, mientras que el modelo de Voigt no permite la posibilidad de una deformación permanente y no puede explicar razonablemente los experimentos esfuerzo-deformación. Al combinar ambos, lo que se hizo en el denominado modelo de cuatro parámetros, que coloca en serie los modelos de Maxwell y Voigt, tal como se muestra en la figura 10. Los cuatro parámetros son el módulo de Maxwell del muelle E_M y la viscosidad del amortiguador η_M , junto con los equivalentes parámetros de Voigt E_V y η_V . Las representaciones de la deformación frente al tiempo aparecen igualmente en la figura 10. El experimento de creep a carga constante, por ejemplo, viene dado por la suma de los términos correspondientes de Maxwell y Voigt.

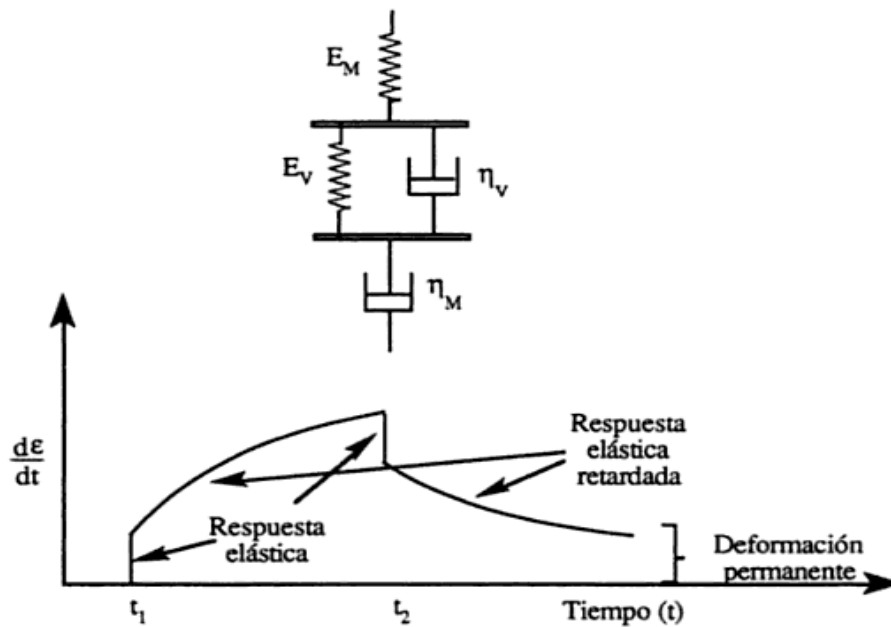


Figura 10. Modelo combinado de cuatro parámetros.

Fuente: Painter et al., 1996

Al combinar en serie los modelos de Maxwell y Voigt, surge un modelo matemático con cuatro parámetros que puede ser representado de forma matemática por la ecuación 11:

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E_M} + \frac{\sigma t}{\eta_M} + \frac{\sigma}{E_M} (1 - e^{-t/\tau_V}) \quad \text{Ecuación 11}$$

ϵ = Deformación (%)

σ =Esfuerzo (N/m²)

EM = Módulo de Maxwell del muelle (MPa)

ηM = Viscosidad del amortiguador (Pa·s)

σt = Esfuerzo en el tiempo determinado por el experimento (s)

τv = Esfuerzo cortante de Voigt (N/m²)

1.1.6. Modelo Reológico del fenómeno de relajación.

De forma matemática el modelo general que describe el fenómeno de relajación como se observa en la ecuación 12 es el siguiente:

$$\sigma(t) = c_1 e^{r_1 t} + c_2 e^{r_2 t} + c_3 \quad \text{Ecuación 12}$$

Para explicar este modelo es necesario basarse en el modelo de Maxwell el cual consta de dos elementos conectados en serie un muelle y un amortiguador como se muestra en la figura 11.

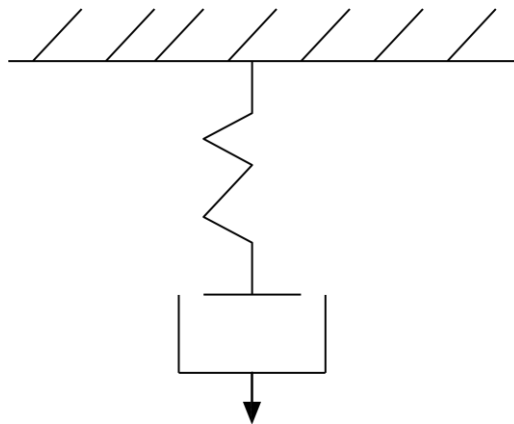


Fig. 11.- Elementos del modelo de maxwell

Estos elementos del modelo de maxwell se explican a continuación, el muelle que representa la elasticidad de la fibra es explicado por la ecuación 13.

$$\sigma_1 = \xi \cdot \varepsilon_1 \quad \text{Ecuación 13}$$

El amortiguador, representa la viscosidad de la fibra durante el fenómeno de relajación, por lo que este elemento es el que impide que la fibra tienda a recuperar su forma original, la expresión matemática se indica en la ecuación 14.

$$\sigma_2 = \eta \cdot \dot{\varepsilon}_2 \quad \text{Ecuación 14}$$

En la modelación del fenómeno de relajación en las fibras de hojas de agave, es necesario determinar la expresión general del modelo de maxwell, para esto se parte de la derivada con respecto al tiempo del elemento elástico del modelo de Maxwell como se indica en la ecuación 15.

$$d\varepsilon_1 / dt = (1 / \xi) \cdot (d\sigma_1 / dt) \quad \text{Ecuación 15}$$

También es necesario determinar la derivada con respecto al tiempo del elemento viscoso del modelo de Maxwell como se indica en la ecuación 16.

$$d\varepsilon_2 / dt = (1 / \eta) \cdot \sigma_2 \quad \text{Ecuación 16}$$

Posteriormente de acuerdo a la teoría de deformación se tienen que sumar las derivadas de los elementos elástico y viscoso, lo que resultara una deformación total de la fibra y a su vez se habrá llegado a la expresión general del modelo de maxwell como se indica en la ecuación 17.

$$d\varepsilon / dt = [(1 / \xi) \cdot (d\sigma_1 / dt)] + [(1 / \eta) \cdot \sigma_2] \quad \text{Ecuación 17}$$

A partir de la expresión general del modelo de Maxwell se puede describir el comportamiento de relajación de las fibras de Agave. Se tiene una deformación constante y esta constante al derivarse obtiene el valor nulo de cero como se observa en la ecuación 18.

$$\varepsilon = k, \quad d\varepsilon / dt = 0 \quad \text{Ecuación 18}$$

Como la derivada de la deformación es cero, ahora solo se tiene la suma de los elementos viscoso y elástico como se observa en la ecuación 19.

$$0 = [(1 / \xi) \cdot (d\sigma_1 / dt)] + [(1 / \eta) \cdot \sigma_2] \quad \text{Ecuación 19}$$

Desarrollando la ecuación 19, se observa como el esfuerzo tiene variación con respecto al tiempo como se indica en la ecuación 20.

$$\sigma(t) = \sigma_0 \cdot e^{-[\xi / \eta] \cdot t} \quad \text{Ecuación 20}$$

Durante la prueba de relajación se obtendrán valores constantes de deformación y las variaciones del esfuerzo con respecto al tiempo son las que se estudiarán, cuando la fibra se somete a una deformación constante. El esfuerzo disminuye con el tiempo como se observa en la figura 12.

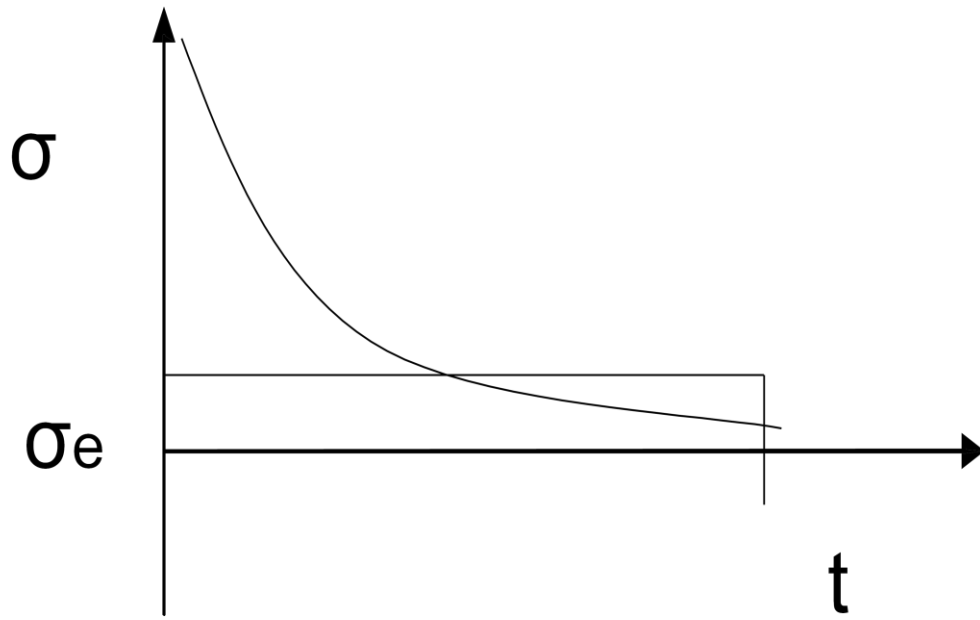


Figura 12. Curva esfuerzo / tiempo de las fibras naturales.

CAPITULO III. METODOLOGÍA Y DESARROLLO EXPERIMENTAL

En este apartado del trabajo se encuentran los procedimientos que se siguieron para la ejecución de los ensayos que permitan valorar las características mecánicas a tensión de las fibras de hojas del agave como se muestra en la Figura 13. El trabajo se dividió en tres etapas: primero se seleccionó el diseño de experimentos, posteriormente se extrajeron las fibras y posteriormente se realizaron los ensayos a tensión.

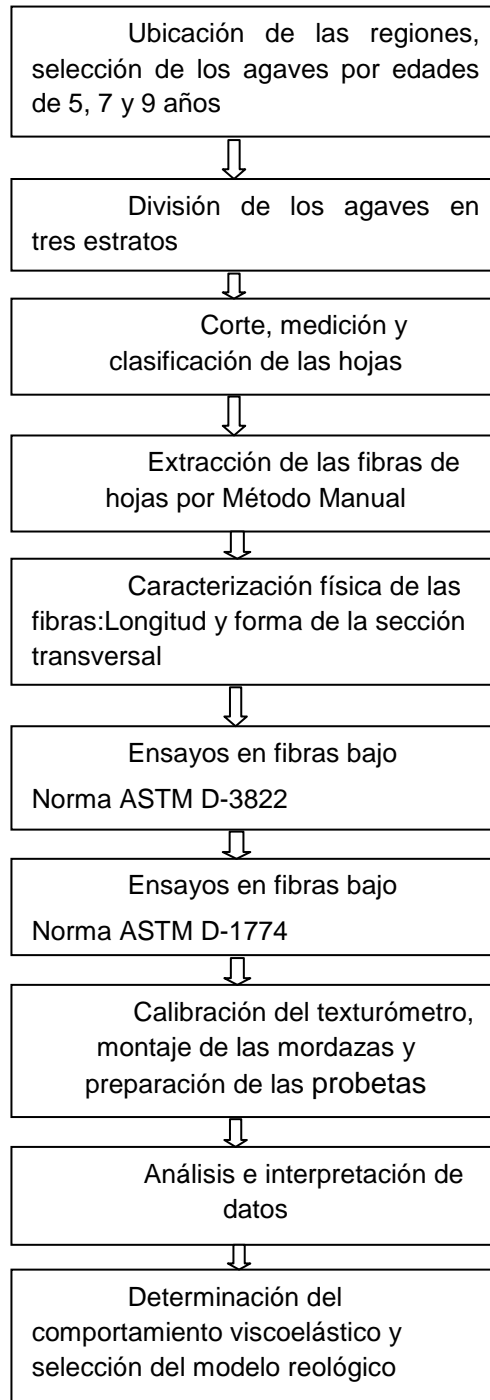


Figura 13. Diagrama metodológico

3.1.- Diseño del experimento.

Para este trabajo de investigación se utilizó el modelo matemático del diseño de experimentos completo aleatorio (DCA) con tres factores mostrado en la ecuación 21, (Montgomeri, 2006).

$$Y_{ijkl} = \mu + R_i + E_i + S_k + (AE)_{ij} + (AS)_{ik} + (ES)_{jk} + (AES)_{ijk} + \varepsilon_{ijkl} \quad \left\{ \begin{array}{l} i = 1, 2, \dots, a \\ j = 1, 2, \dots, b \\ k = 1, 2, \dots, c \\ l = 1, 2, \dots, n \end{array} \right. \quad \text{Ecuación 21}$$

Se utilizó un diseño completamente aleatorio (DCA), con arreglo factorial 3^3 . El primer factor fue considerado como la región de procedencia de las fibras teniendo como parámetro los metros sobre el nivel del mar de donde provienen las hojas (R) con tres niveles: el primer nivel es de la población de Tlacolula con 1600 msnm (R1), el segundo nivel es de la población de Yautepec con 850 msnm (R2) y en tercer nivel es de la población de Ejutla con 1440 msnm (R3). Como segundo factor fue considerado la edad de los agaves de los cuales fueron cortadas las hojas con tres niveles, de 5 años (E1), de 7 años (E2) y de 9 años (E3). Por último se consideró como tercer factor la división de tres estratos de los agaves (S), con tres niveles: estrato 1 parte baja del agave (S1), estrato 2 parte media del agave (S2) y estrato 3 parte alta del agave (S3). Los ensayos de resistencia última a la tensión así como los de relajación se realizaron a la altura total de la probeta de 25 cm. Se obtuvieron un total de 27 tratamientos y se realizaron 10 repeticiones como indica la norma ASTM D- 1774 (2001). Por lo que se tuvieron un total de 540 unidades experimentales.

Los tratamiento obtenidos fueron los siguientes: R1E1S1, R1E1S2, R1E1S3, R1E2S1, R1E2S2, R1E2S3, R1E3S1, R1E3S2, R1E3S3, R2E1S1, R2E1S2, R2E1S3, R2E2S1, R2E2S2, R2E2S3, R2E3S1, R2E3S2, R2E3S3, R3E1S1, R3E1S2, R3E1S3, R3E2S1, R3E2S2, R3E2S3, R3E3S1, R3E3S2, R3E3S3. En el caso de este trabajo de investigación las variables a evaluar fueron; el fuerza promedio reportado en Newton, la deformación porcentual (ε) expresada en porciento (%), la deformación parcial (ε_p) expresada en porciento (%), la deformación permanente (ε_t) expresada en porciento (%).

3.2.- Ubicación de los cultivos y selección de los agaves.

La metodología inicia con la selección de Agave de la especie *angustifolia* Haw, en estado de maduración (Silva et al., 2004), así como durante la etapa de poda de hojas. Los lugares en donde se realizará la selección, serán cultivos de la zona de la denominación de origen del mezcal en el estado de Oaxaca, que corresponden a los distritos de San Carlos Yautepec, Tlacolula y Ejutla de Crespo. Los requerimientos para seleccionar el agave serán los siguientes:

- Que las hojas tengan la longitud necesaria para su cosecha, esta información será proporcionada por el productor, el cual lleva un control sobre la edad de sus cultivos. En este caso la edad de las plantas serán de 5, 7 y 9 años.
- Otro criterio para seleccionar será observar que tengan la menor cantidad de hojas secas, maltratadas o seccionadas.

Después, se clasificarán las hojas por estratos con el objetivo de controlar su ubicación en la planta. Un estrato representa una tercera parte del tallo de la planta en el que las crecieron y se desarrollaron juntas. El estrato 1 se ubica en la base del agave y de manera ascendente se enumerarán los siguientes dos estratos, como se esquematiza en la figura 14.

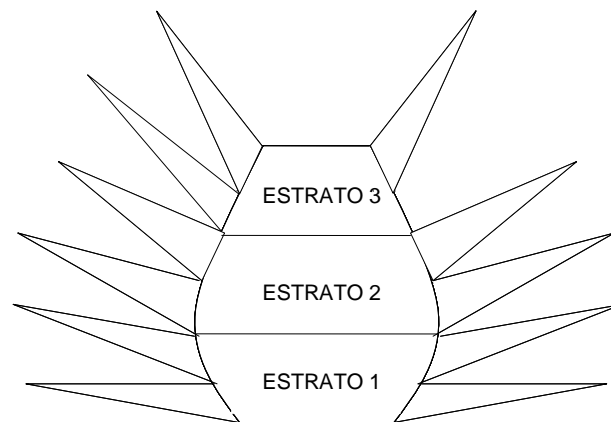


Figura 14. Niveles en el agave.

3.3.- Análisis del experimento.

En el caso de este trabajo de investigación se evaluará la fuerza promedio (σ) reportado en Newton (N), la deformación porcentual (ϵ) expresada en por ciento (%), la deformación parcial (ϵ_p) expresada en por ciento (%), la deformación permanente (ϵ_t) expresada en por ciento (%), con diez replicas, los 540 ensayos se realizaron completamente al azar, como se muestra en la Tabla 4 y para identificar los tratamientos a ensayar se utilizó la siguiente nomenclatura: (R=Región, E=Edad, S=Estrato).

Tabla 4. Tratamientos obtenidos para los ensayos.

Número	TRATAMIENTO
1	R1E1S1
2	R1E1S2
3	R1E1S3
4	R1E2S1
5	R1E2S2
6	R1E2S3
7	R1E3S1
8	R1E3S2
9	R1E3S3
10	R2E1S1
11	R2E1S2
12	R2E1S3
13	R2E2S1
14	R2E2S2
15	R2E2S3
16	R2E3S1
17	R2E3S2
18	R2E3S3
19	R3E1S1
20	R3E1S2
21	R3E1S3
22	R3E2S1
23	R3E2S2
24	R3E2S3
25	R3E3S1
26	R3E3S2
27	R3E3S3

Posteriormente se empleó un análisis de varianza de modelo tres factorial de efectos fijos para cada una de las variables a evaluar; de donde a=2, b=2, c=3 y n=10. Las ecuaciones que se emplearan para dicho análisis son descritas a continuación:

En el caso de la suma total de cuadrados corregida se determinará usando la ecuación 22.

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c \sum_{l=1}^n y_{ijkl}^2 - \frac{y^2}{abcn} = \text{Ecuación 22}$$

Finalmente para la suma de cuadrados del error, se calcula restando la suma de cuadrados de cada efecto principal e interacción a la suma total de cuadrados.

La tabla 5 muestra un resumen del análisis de varianza para el modelo tres factorial de efectos fijos. Las pruebas F son para probar los efectos principales y las interacciones se deducen a partir de los valores esperados de las medias de cuadrados.

Tabla 5. Análisis de varianza para los ensayos de compresión en las hojas del *Agave angustifolia* Haw

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media de cuadrados
Región(R)	SS _N	a-1	MS _R
Edad(E)	SS _E	b-1	MS _E
Estrato(S)	SS _S	c-1	MS _S
RE	SS _{RE}	(a-1)(b-1)	MS _{RE}
RS	SS _{RS}	(a-1)(c-1)	MS _{RS}
ES	SS _{ES}	(b-1)((c-1)	MS _{ES}
RES	SS _{RES}	(a-1)(b-1)(c-1)	MS _{RES}
Error	SS _E	abc(n-1)	MS _E
Total	SS _T	abcn-1	

Cabe destacar que el análisis ANOVA se realizará con el programa SAS 9.0 para Windows, por lo que será necesario codificar los datos para ingresarlos al programa.

3.4 Caracterización física de las hojas.

Para realizar las mediciones se utilizaron los instrumentos con los que se cuentan en el laboratorio de metrología del CIIDIR IPN Unidad Oaxaca. Posteriormente se ordenaron las hojas dependiendo de la región de donde provenían. Finalmente se realizaron las mediciones geométricas mas importantes como son su longitud (L), espesor de la hoja (e) y el ancho máximo de la hoja (A_m) y su peso (w), como se muestra en la Figura15 y utilizando los instrumentos de medición que se muestran en la Tabla 6.

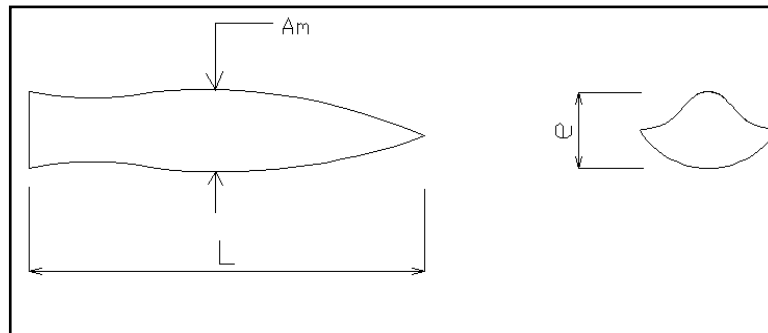


Figura 15. Dimensiones geométricas de las hojas.

La numeración con la nomenclatura a emplear será: No. estrato – No. hoja por estrato, como se observa en la figura 16. Esta clasificación se hará con la finalidad de controlar la ubicación de las hojas en el agave, este control se mantendrá en todo el proceso de extracción, así como en las diferentes etapas del desarrollo experimental.

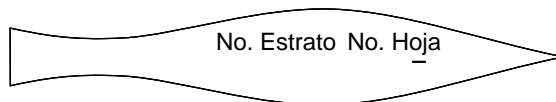


Figura 16. Nomenclatura a utilizar en las hojas.

En el laboratorio se verificó la calidad de las hojas con respecto a que se encuentren en óptimas condiciones, esto significa sin daño biológico causado por plaga, daño mecánico o parcialmente secas, las condiciones del laboratorio durante el desarrollo de esta actividad fue de 21 ± 5 °C y 60 ± 5 humedad relativa.

Tabla 6. Equipo de medición para las dimensiones geométricas de las hojas.

Equipo	Característica
Balanza granataria de dos brazos	Capacidad máxima: 20 Kg., Precisión: 1 g.
Calibrador pie de rey digital	Rango: 0 – 300 mm.. Precisión: 0.01 mm.
Flexómetro metálico	Rango: 0 – 8 m. Precisión: 1 mm.

3.5.- Proceso de extracción de las fibras por el método manual.

La secuencia metodológica del proceso manual para extraer las fibras de las hojas del agave, es el siguiente:

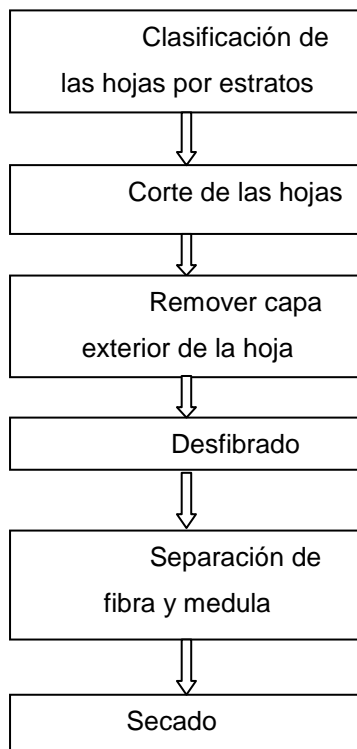


Figura 17. Proceso de desfibrado

Es importante considerar factores que determinan la cantidad de ensayos a realizar como: el material para realizar las pruebas, la disponibilidad de los equipos e instrumentos para llevar a cabo la experimentación, el costo de cada uno de los ensayos y el tiempo necesario para desarrollar cada una de las actividades experimentales.

Los criterios que se utilizaron para determinar la cantidad de ensayos a realizar para esta investigación serán los siguientes: No existen artículos científicos relacionados para determinar las propiedades reológicas de las fibras del *Agave angustifolia* Haw, pero si hay trabajos en los que describen el comportamiento viscoelástico en fibras naturales de Kenaf y *Agave americana*. Para esta investigación se trabajarán con agaves de 5, 7 y 9 años de edad, se desarrollará un muestreo estratificado, que consistirá en dividir a la población en subgrupos o estratos. El agave será dividido uniformemente en tres estratos, cada uno de estos estratos representa un conjunto de hojas que tienen en común que crecieron y se desarrollaron juntas a una misma altura sobre el tallo de la planta.

El criterio principal para determinar el número de ensayos, fue tomado en base a las normas ASTM D-3822 y ASTM D-1774.

3.6.- Caracterización física de las fibras: Peso, longitud y diámetro.

El procedimiento que se seguirá para realizar la medición de la longitud y el peso de la fibra, será en base a la norma ASTM D-1059, que se describe a continuación:

- a) Tamaño de muestra: De acuerdo al tamaño será de 20 fibras.
- b) Acondicionamiento: Para realizar cualquier medición a la fibra será necesario acondicionarla por 24 horas a una temperatura de $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ y una humedad relativa de $65\% \pm 2\%$.
- c) Longitud de la fibra: Esta actividad se realizará, utilizando un vernier marca Mitutoyo con un rango de medición de 0 a 280 mm y una graduación de 0.05 mm.
- d) Peso de la fibra: Para esta actividad se utilizará una balanza analítica marca Sartorius Basic plus modelo BP211D. Los valores obtenidos se registrarán en gramos, en la tabla 7 se presentan sus características.

Tabla 7. Características de la balanza analítica.

Característica	Resultado
Estructura de pesaje	DualRange
Capacidad	40 g
Rango lectura	0.01 mg
Rango de Tara (Por sustracción)	- 210 mg
Reproducibilidad (Desviación estándar)	≤ 0.02 mg
Linealidad	≤ ± 0.03 mg
Tiempo de respuesta	≤ 12 s
Temperatura de operación	+10 °C a +30 °C
Tamaño del plato	Ø 80 mm
Dimensiones	204x297x33 2 mm
Voltaje	115 V

Fuente: Sartorius Mechatronics, 2000

Para observar el diámetro de la fibra se utilizará un microscopio óptico modelo AxioLab, marca Carl Zeiss con características físicas como se presentan en la tabla 8. En este microscopio se acoplará una cámara digital Cannon PowerShot A640 y por medio de una interfase de USB se captarán las imágenes en tiempo real en un equipo de cómputo. Para realizar la medición del área se empleará el programa de computo Axiovision LE.

Tabla 8. Características del microscopio.

Característica	Resultado
Tipo de microscopio	Óptico para luz transmitida y epifluorescencia.
Temperatura de trabajo	+5 °C a +40°C.
Unidad alimentadora	6 V 25 W
Platina	De desplazamiento en cruz 75 x 30 mm
Oculares	PL 10x/18 Br
Objetivos	4x, 10x, 40x y 100x

Fuente: Zeiss, 2000.

3.7.- Ensayos de resistencia última a la tensión.

Este ensayo se realizará con la finalidad de comparar la deformación y esfuerzo uniaxial. En estas pruebas se ensayaran fibras de hojas de agaves de las regiones de Ejutla, Tlacolula y San Carlos Yautepec, también serán agaves de 5, 7 y 9 años, también los agaves serán divididos en 3 estratos para la ubicación de las hojas. De esta forma el diseño experimental de la prueba serán tres regiones, tres edades y tres estratos, formando un total de 27 combinaciones, las cuales se repetirán en 10 veces de acuerdo a la norma ASTM-D. En esta prueba se obtendrá como resultado los niveles de esfuerzo máximo y mínimo.

El procedimiento experimental se seguirá con base a la norma ASTM D-3822 y se detalla en los siguientes puntos:

- Selección de la muestra. El número de elementos a seleccionar para realizar esta prueba será de 270 fibras, con un diseño factorial de 3^3 y con 10 repeticiones.
- Acondicionamiento. Las fibras deben de mantenerse a una temperatura de $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ y una humedad relativa de $65\% \pm 2\%$, por un tiempo de 24 horas.
- El equipo se calibrará y se establecerán las condiciones de prueba de acuerdo a la norma ASTM D-76 como se muestra en la tabla 9.

Tabla 9. Condiciones de ensayo para pruebas a tensión uniaxial.

Condiciones	Parámetro
Longitud entre mordazas	250 mm
Velocidad de deformación	120 mm/min

Fuente: ASTM D-1822

3.8.- Ensayos para prueba de creep.

Este ensayo se realizará para determinar la elasticidad de las fibras. En estas pruebas se ensayaran fibras de hojas de agaves de las regiones de Ejutla, Tlacolula y San Carlos Yautepec, también serán agaves de 5, 7 y 9 años, también los agaves serán divididos en 3 estratos para la ubicación de las hojas. De esta forma el diseño experimental de la prueba serán tres regiones, tres edades y tres estratos, formando un total de 27 combinaciones, las cuales se repetirán en 6 veces de acuerdo a la norma ASTM-D 1822. En esta prueba se obtendrá como resultado las deformaciones parcial, permanente y el trabajo de deformación máximo de la fibra.

El procedimiento experimental se seguirá con base a la norma ASTM D-1774 y se detalla en los siguientes puntos:

- Selección de la muestra. El número de elementos a seleccionar para realizar esta prueba será de 162 fibras. Con un diseño factorial de 3^3 y con 6 repeticiones.
- Acondicionamiento: las fibras deben de mantenerse a una temperatura de $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ y una humedad relativa de $65\% \pm 2\%$, por un tiempo de 24 horas.
- El equipo se calibrará y se establecerán las condiciones de prueba de acuerdo a la norma ASTM D-76 como se muestra en la tabla 10.

Tabla 10. Condiciones de ensayo para texturómetro.

Condiciones	Parámetro
Longitud entre mordazas	250 mm
Velocidad de deformación	90 mm/min
Fuerza	3 N
Tiempo	180 segundos

Fuente: ASTM D-1774

3.9.- Texturómetro TA-XT2i para prueba de materiales.

En la figura 18, se muestra el equipo a utilizar para la realización de los ensayos a tensión, que será un texturómetro TA-XT2i para prueba de materiales.



Figura 18. Texturómetro TA-XT2i/25.

Las características técnicas del equipo se presentan en la tabla 11.

Tabla 11. Características del equipo

Característica	Resultado
Precisión de medición de carga	$\pm 0.025\%$ de la capacidad de la celda de carga
Precisión de medición de deformación	$\pm 0.0025\%$
Precisión de velocidad de la cruceta	$\pm 0.1\%$ de velocidad fijada
Suministro eléctrico	50 Hz \pm 15 Hz
Temperatura de funcionamiento	0 °C a +40 °C
Rango de posición	0.1 - 295 mm
Rango de velocidad	0.1 – 10 mm/seg

Fuente: Stable Micro Systems, 2011.

Las características de las mordazas utilizadas, así como el procedimiento de calibración, realización del ensayo e interpretación de resultados, se describen en los siguientes incisos:

- a) Tipo de mordazas. En la figura 19, se ilustran las mordazas mecánicas de cara plana modelo A/TG, las cuales proporcionan un método adecuado para la sujeción de fibras, cuerdas, hilos y alambres finos.

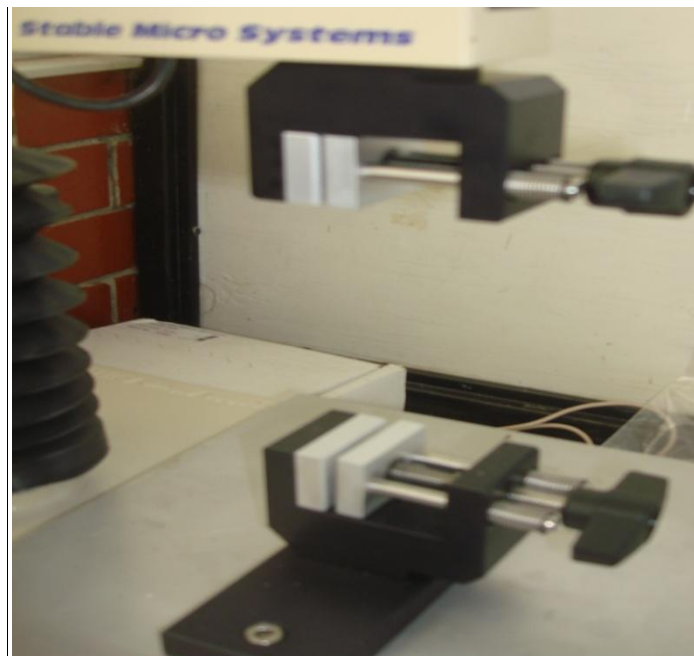


Figura 19. Mordazas de cara plana.

b) Calibración del texturómetro. Antes de realizar cada uno de los ensayos de tensión fue necesario calibrar el equipo bajo la norma ASTM D-76 para que las gráficas obtenidas realmente representen el fenómeno en estudio. El procedimiento de calibración fue el siguiente:

- El texturómetro debe estar libre de cargas y fuerzas externas así como de no tener ningún montaje.
- Se coloca una carga patrón de 5 kg en la plataforma de calibración como se indica en la figura 20.
- Una vez que no exista error y que aparezca en la pantalla del teclado calibración realizada, se procede a retirar la carga.

c) Montaje y calibración de las mordazas. Después de haber calibrado el texturómetro se realiza el montaje de las mordazas, posteriormente se procede a calibrar la altura de las mordazas. Esto se realiza de la siguiente forma:

- La mordaza superior es llevada a 2 milímetros de separación de la mordaza inferior.
- Se gira la llave en configuración de máquina.
- Del teclado, se pulsa la opción calibrar y en el centro del teclado deberá aparecer “Cal” y en el lado derecho aparecerá “Force”.
- Del teclado se presiona la opción +. En el lado derecho del teclado aparecerá “disp”.
- Para finalizar, del teclado se presiona la opción “ENT”.



Figura 20. Colocación de pesa de 5 kilogramos para calibración de celda de carga

3.9.1.- Montaje y preparación de las probetas.

Procedimiento para la preparación de las probetas:

Para cada fibra se cortará un trozo de papel-cartulina de 10 x 25 cm con un corte interno de 5 x 20 cm, la fibra se unió al papel con pasta de ensamble mecánico.

Características del pegamento:

Es una pasta para usos múltiples

Resistente temperaturas de -50 °C a 120 °C

No se encoge, no se cuartea y fija de forma adecuada

Seca en un periodo de 16 horas.

Una vez alineada la fibra se procede a unirla en el papel-cartulina por medio de la pasta metálica como se muestra en las figuras 21a y 21b.

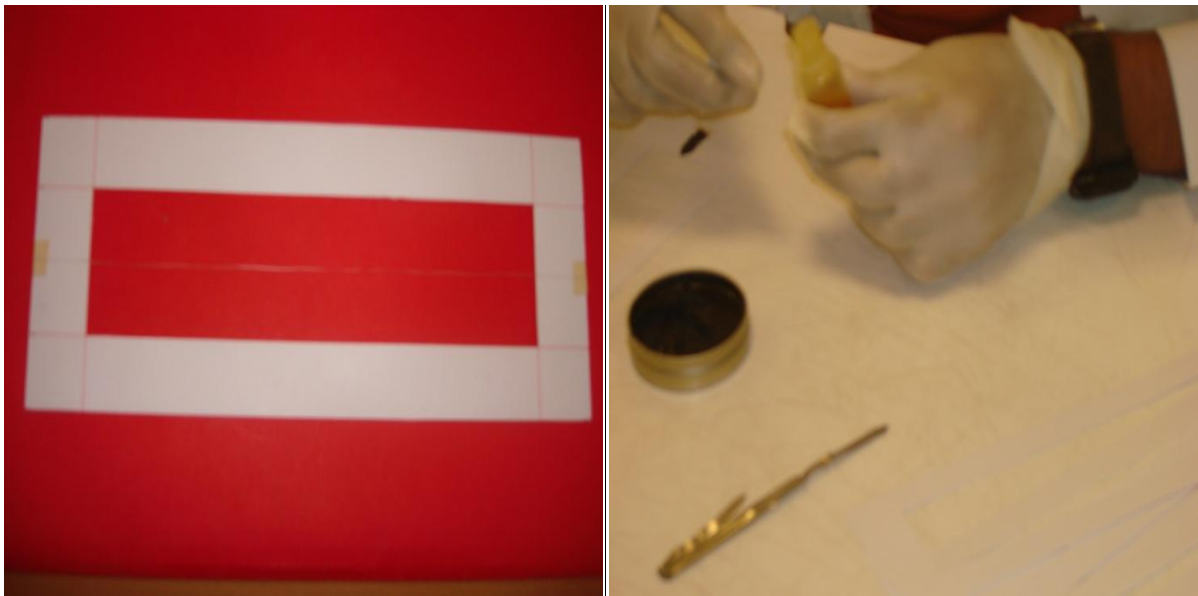


Figura 21. A) Alineación de la fibra y b) Pegado de la fibra.

CAPITULO IV. RESULTADOS

Los datos se trataron de acuerdo al modelo estadístico tres factorial, por lo que estadísticamente y de acuerdo al análisis del programa SAS 9.0 se obtiene la tabla 12 de significancias entre las combinaciones.

4.1. Análisis de RUT de todas las combinaciones.

Análisis de resultados: en la Tabla 12 se observa lo siguiente el valor más alto encontrado de resistencia a la tensión fueron las fibras recolectadas de la región 3, en agaves de 5 años de edad, extraídas del estrato 2 con un valor medio de 10.97 N.

Tabla 12. Resultados de RUT.

Combinación	Región R	Edad A	Estrato E	Media	Desv. Est	Coef. Var
1	1	5	1	8.195 ab	2.60	0.32
2	2	5	1	6.241 ab	2.03	0.33
3	3	5	1	10.022 a	3.18	0.32
4	1	5	2	10.658 a	1.64	0.15
5	2	5	2	9.43 a	2.36	0.25
6	3	5	2	10.974 a	3.18	0.29
7	1	5	3	9.639 a	2.66	0.28
8	2	5	3	6.815 ab	3.18	0.47
9	3	5	3	8.602 ab	3.88	0.45
10	1	7	1	7.536 ab	3.76	0.50
11	2	7	1	9.651 a	3.41	0.35
12	3	7	1	9.925 a	4.52	0.46
13	1	7	2	6.208 ab	1.43	0.23
14	2	7	2	10.18 a	2.96	0.29
15	3	7	2	8.086 ab	3.75	0.46
16	1	7	3	7.17 ab	2.17	0.30
17	2	7	3	8.571 ab	4.52	0.53
18	3	7	3	9.8 a	4.37	0.45
19	1	9	1	7.862 ab	1.54	0.20
20	2	9	1	9.277 a	3.22	0.35
21	3	9	1	6.687 ab	5.19	0.78
22	1	9	2	7.809 ab	2.26	0.29
23	2	9	2	8.692 a	3.19	0.37
24	3	9	2	8.287 ab	2.08	0.25
25	1	9	3	3.475 b	0.82	0.23
26	2	9	3	9.622 a	1.55	0.16
27	3	9	3	9.677 a	2.49	0.26
Media de todas las combinaciones				8.48		
Desv. Est.				1.66		
Coef. De Var.				0.20		

En la tabla 12 también se analizan las diferencias significativas entre las combinaciones, de esta forma se observa que medias con letras iguales no tienen diferencias significativas, como por citar la combinación 7, 8 y 9 que corresponde a los agaves de 5 años del estrato más alto y de las tres regiones seleccionadas. En la figura 22 se muestra una gráfica de las combinaciones de la RTU y su distribución de forma ordenada.

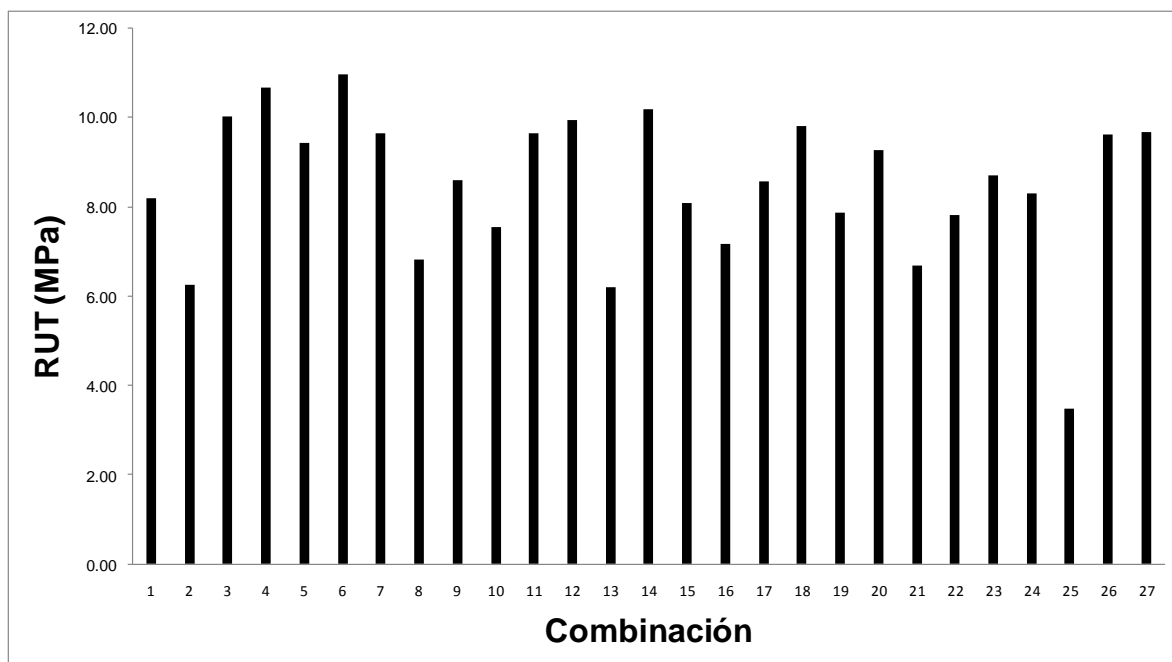


Figura 22. Distribución de RUT en las combinaciones de los factores región, edad y estrato

4.2 Análisis de la RTU por factores.

En la Figura 123, se observa lo siguiente las fibras de la región 3 son las más resistentes debido a que alcanzan un valor medio de 9.12 N, seguidas de las fibras de la región 2 con un valor medio de 7.82 N y finalmente las fibras con menor resistencia a la tensión son las fibras que fueron recolectadas de la región 1.

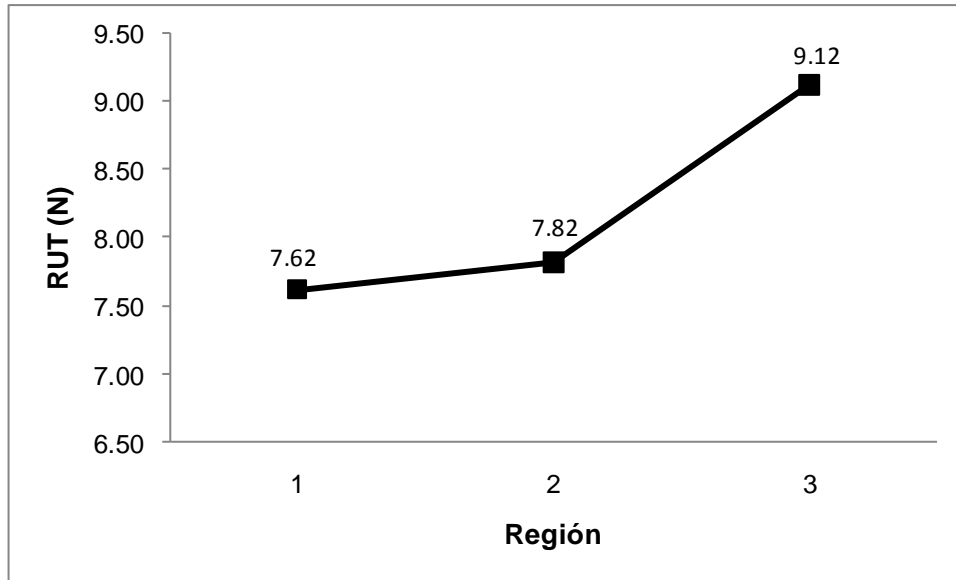


Figura 13. Resistencia de las fibras por regiones.

En la 24, se observa lo siguiente, las fibras de menor edad equivalente a las de 5 años son las que alcanzan la mayor resistencia con un valor medio de 8.95 N, seguidas de las fibras de 7 años con un valor medio de 8.57 N, y finalmente las fibras con menor resistencia son las fibras de 9 años de edad alcanzando solamente un valor medio de 7.93 N.

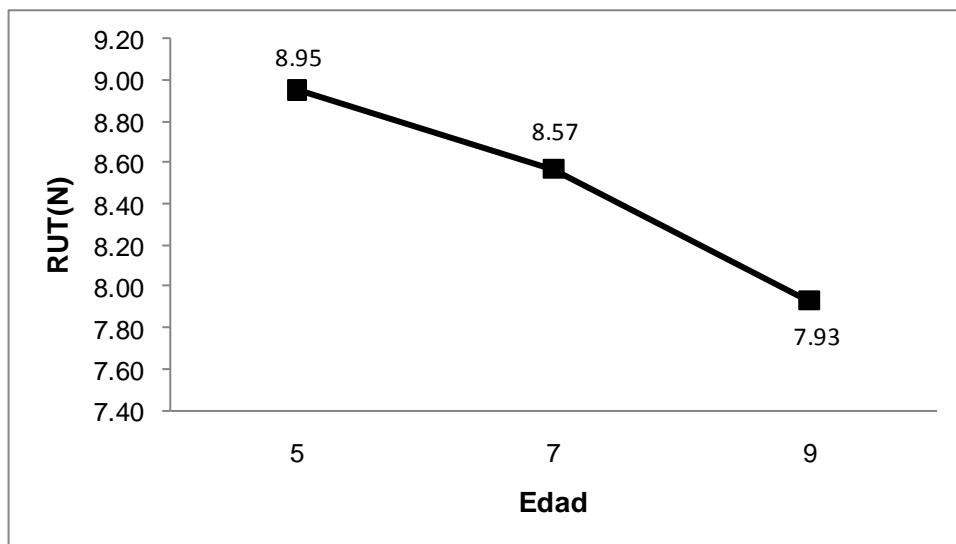
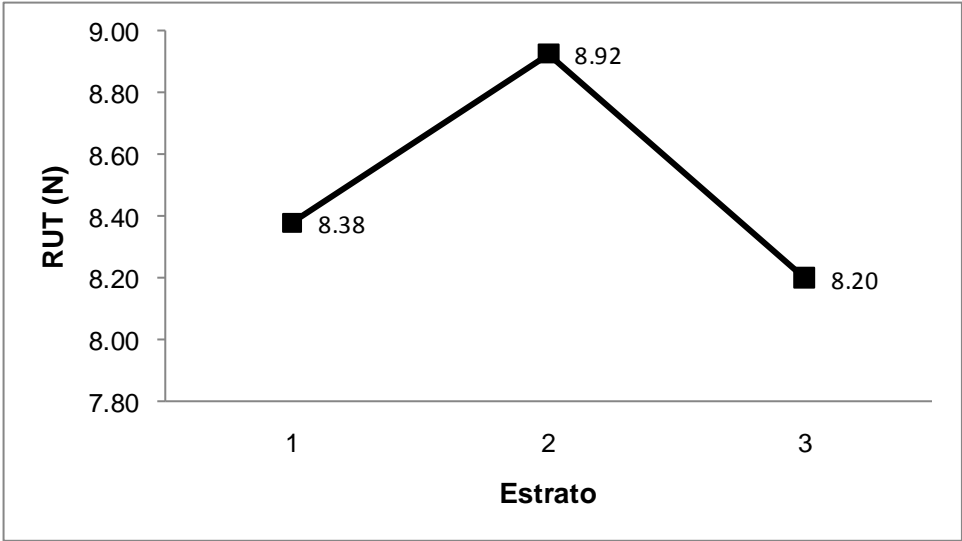


Figura 24. Resistencia de fibras por edad de agaves.

En la figura 25 se observa lo siguiente, las fibras extraídas del estrato numero 2 son las mas resistentes alcanzando un valor medio de 8.92 N, seguidas por las fibras ubicadas en el estrato numero 1 del agave con un valor medio de 8.38 N, las fibras con menor resistencia son las ubicadas en el estrato 3 del agave alcanzando solamente un valor de 8.20 N.



Figurara 25. Comportamiento de RUT en los estratos

4.3 Análisis de deformación.

Para el caso de la deformación porcentual en la

Tabla 13 y Figura 26 se observa lo siguiente, el tipo de combinación en el que la fibra soporta mayor cantidad de deformación antes de llegar a la ruptura es la fibra proveniente de la región 1, de 7 años de edad y extraída del estrato número 2 con un valor medio de 5.91%.

Tabla 13. Deformación porcentual de las combinaciones.

Combinación	Región	Edad	Estrato	Media	Desv. Est	Coef. Var
	R	A	E			
1	1	5	1	4.20	1.05	0.25
2	2	5	1	3.18	0.68	0.21
3	3	5	1	3.25	1.07	0.33
4	1	5	2	4.10	0.66	0.16
5	2	5	2	4.82	1.48	0.31
6	3	5	2	3.65	1.29	0.35
7	1	5	3	4.76	1.32	0.28
8	2	5	3	3.17	1.04	0.33
9	3	5	3	4.15	1.20	0.29
10	1	7	1	3.78	1.57	0.42
11	2	7	1	3.83	1.12	0.29
12	3	7	1	3.38	0.92	0.27
13	1	7	2	5.91	2.09	0.35
14	2	7	2	3.86	0.62	0.16
15	3	7	2	2.58	1.00	0.39
16	1	7	3	4.54	1.68	0.37
17	2	7	3	2.46	0.69	0.28
18	3	7	3	4.37	1.74	0.40
19	1	9	1	3.94	1.18	0.30
20	2	9	1	3.48	0.73	0.21
21	3	9	1	2.80	1.82	0.65
22	1	9	2	3.80	1.40	0.37
23	2	9	2	2.73	0.95	0.35
24	3	9	2	3.58	0.85	0.24
25	1	9	3	1.91	0.39	0.20
26	2	9	3	2.59	0.51	0.20
27	3	9	3	3.57	0.32	0.09
Media de todas las combinaciones				3.64		
Desv. Est.				0.85		
Coef. De Var.				0.23		

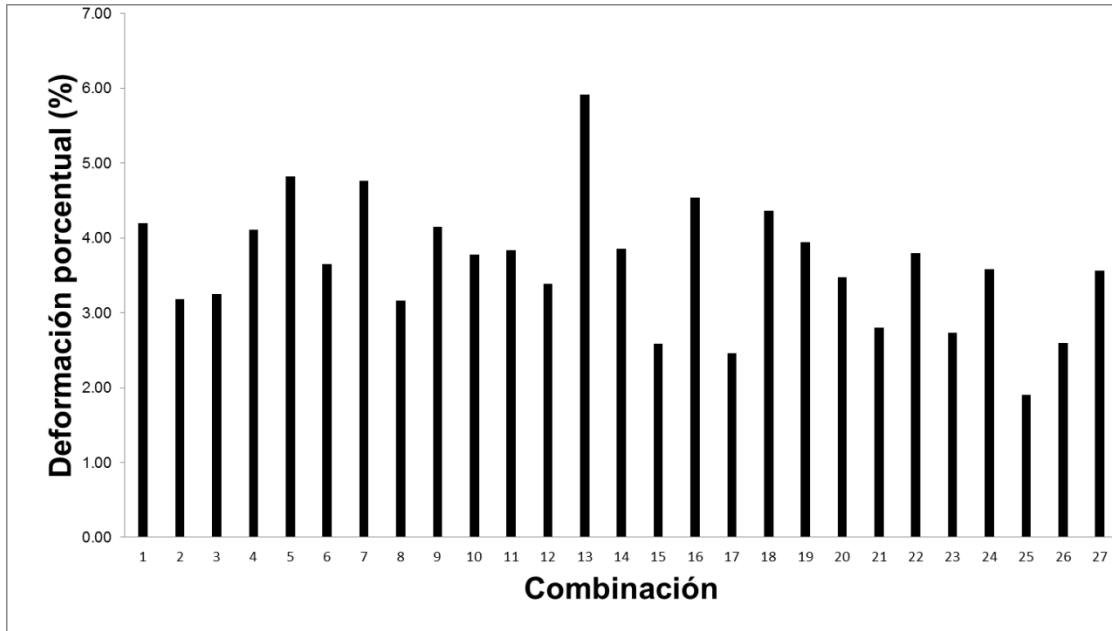


Figura 26. Deformación de la combinación de los factores región, edad y estrato.

4.4. Análisis de la deformación por factores.

En la 27 se observa lo siguiente, las fibras recolectadas de la región número 1 alcanzando un valor medio de 4.10%, seguida de las fibras recolectadas de la región 3 en donde alcanzaron un valor medio de 3.48% y finalmente las fibras con menor porcentaje deformación fueron las recolectadas de la región numero 2 alcanzando solamente un valor de 3.08%.

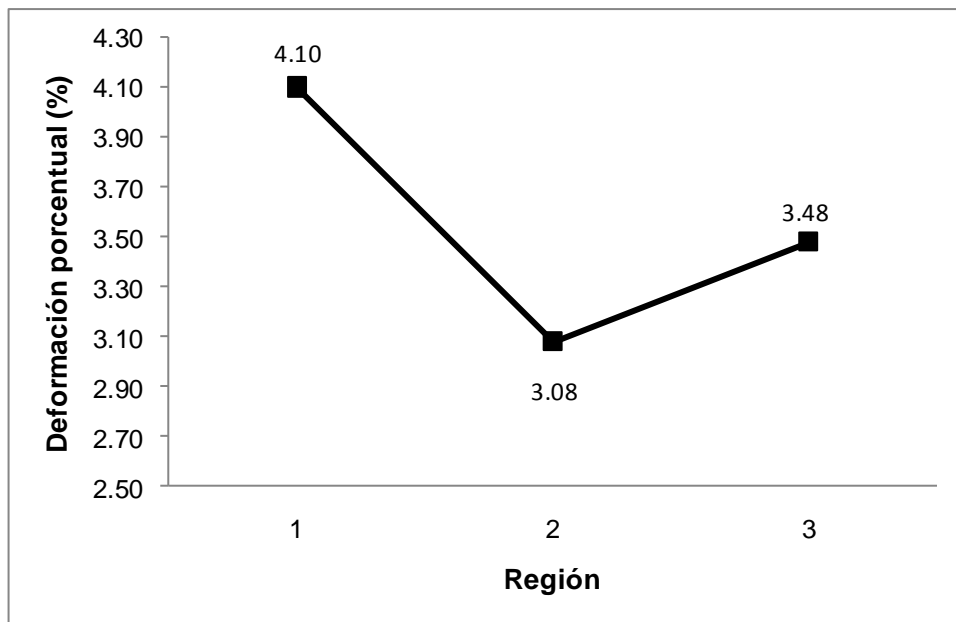


Figura 27. Deformación porcentual por regiones.

En la Figura 28 se observa lo siguiente, las fibras más jóvenes equivalentes a las de 5 años de edad alcanzan los valores más altos en su porcentaje de deformación con un valor medio de 3.92%, seguida de las fibras de 7 años donde alcanzaron un valor medio de 3.86%, finalmente las fibras de 9 años son las que se deforman menos alcanzando solamente un valor de 3.15%

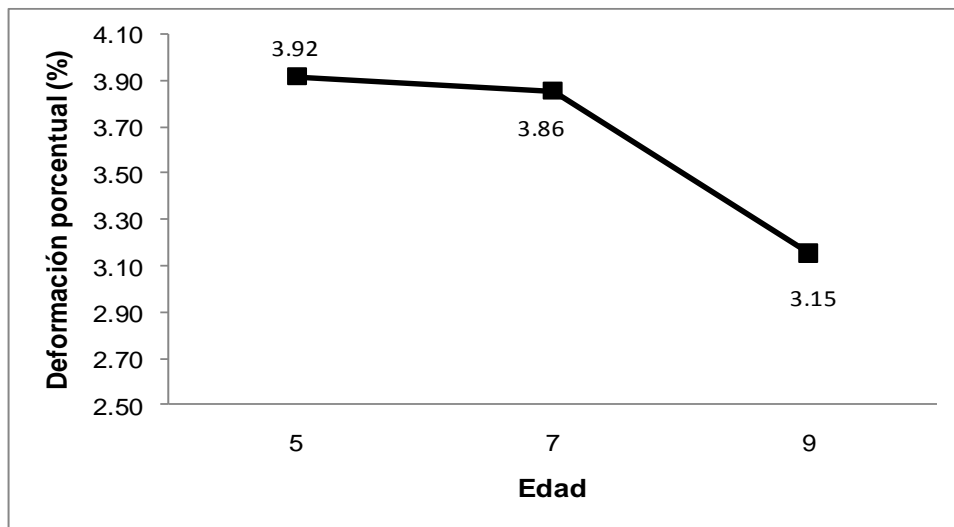


Figura 28. Deformación porcentual por edades.

Finalmente la Figura 29 muestra que las fibras extraídas del estrato número 2 son las que alcanzan mayor cantidad de deformación antes de llegar a la ruptura, alcanzando un valor medio de 3.89%, seguidas por las fibras extraídas del estrato número 1 donde alcanzaron un valor medio de 3.54% y finalmente las fibras obtenidas del estrato número 3 es donde las fibras solamente alcanzan un valor de 3.51% de deformación porcentual.

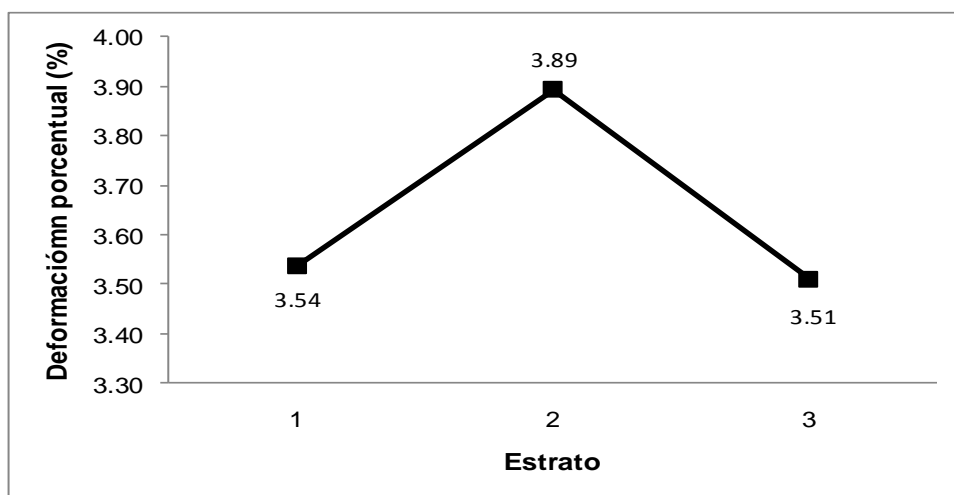


Figura 29. Deformación porcentual por estratos

De las Figura 22 y Figura 26, se obtiene la figura 30 en ella se puede observar la relación que guardan las variables de RUT y deformación en cada una de las combinaciones ensayadas.

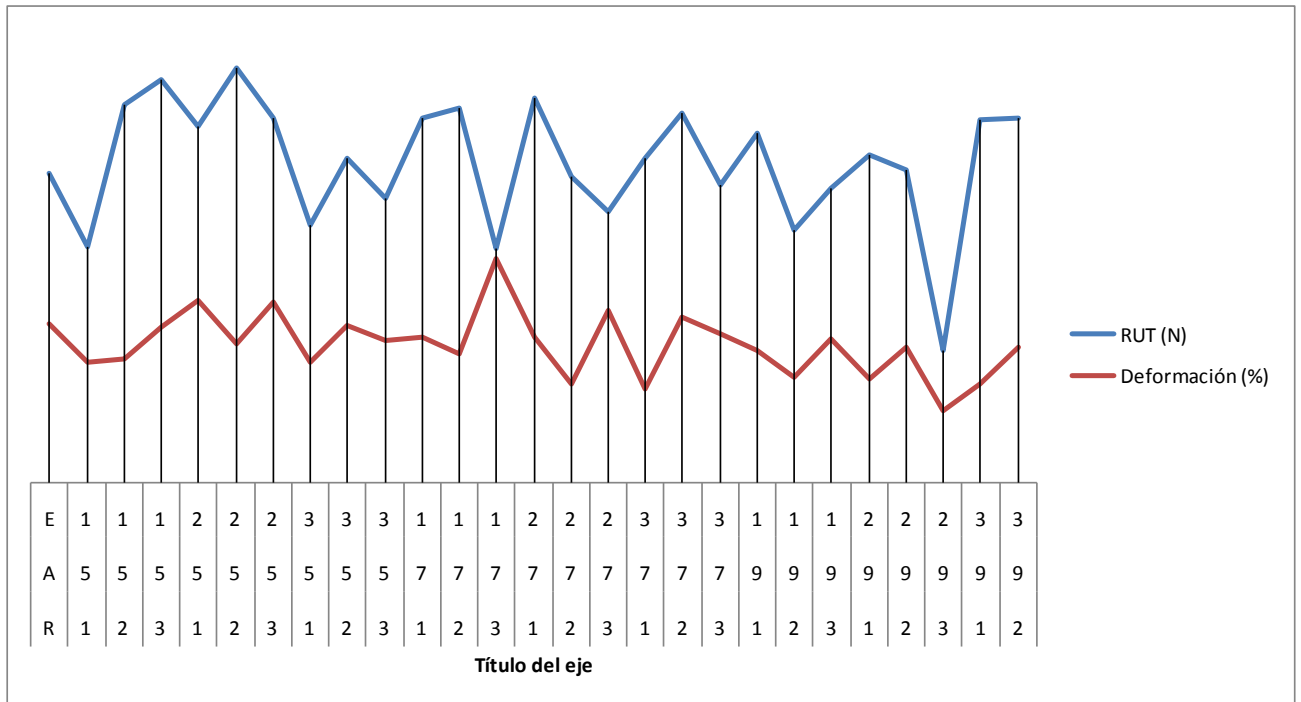


Figura 30. Relación de RUT y deformación en las combinaciones

De la figura 23 y figura 27 se obtiene la figura 31, en esta figura se observa la relación que guardan la RUT y deformación con respecto a las regiones.

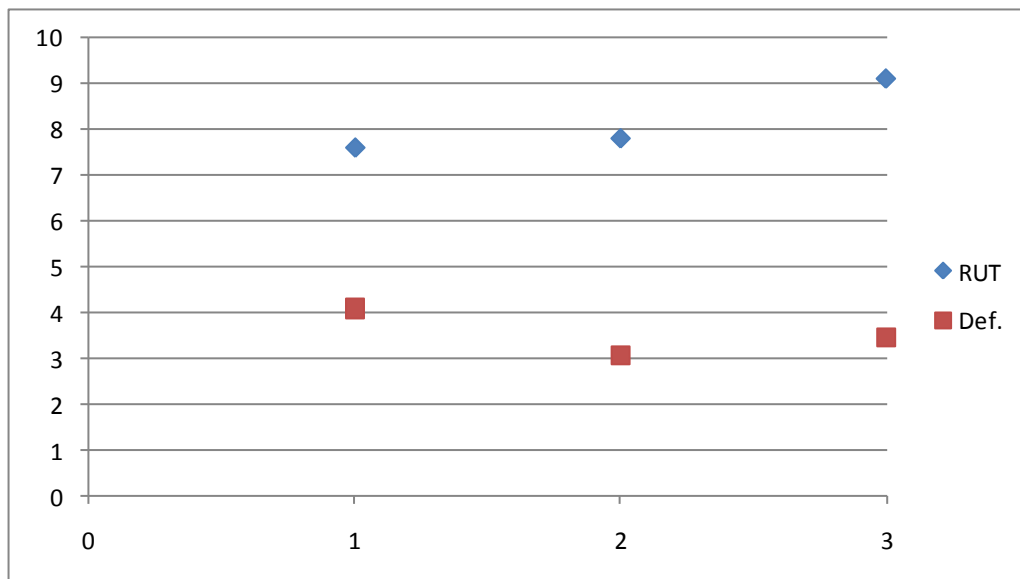


Figura 31. Relación de RUT y deformación con respecto a las regiones

De la figura 24 y Figura 28 se obtiene la Figura 32, es esta figura se puede observar que tanto la RUT como la deformación guardan una relación con la edad de los agaves, a medida que las fibras de los agaves tienen mayor edad su resistencia y su deformación disminuyen.

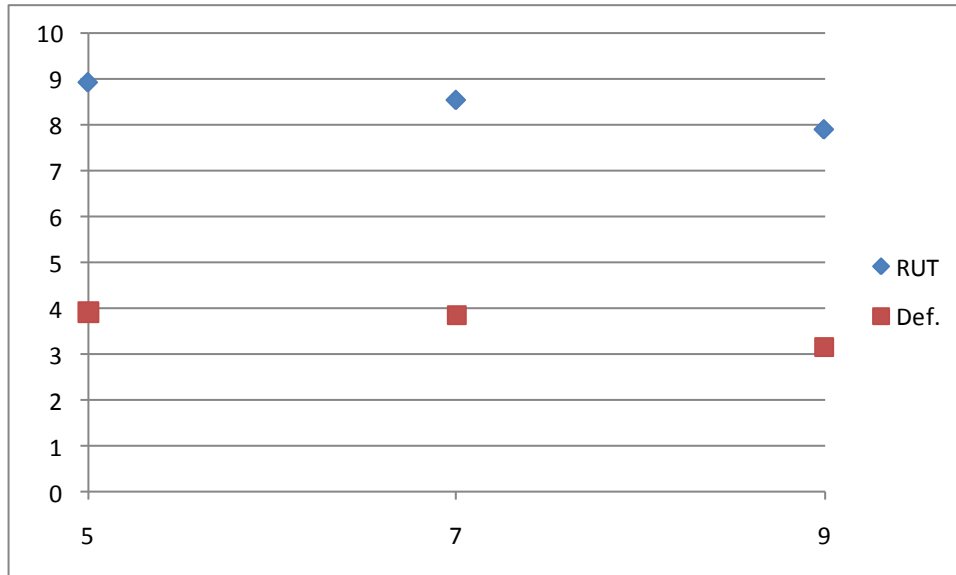


Figura 32. Relación de RUT y deformación con respecto a la edad de los agaves.

Finalmente de la figura 25 y figura 29 se obtiene la figura 33 en ella se observa que tanto la RUT como la deformación son mayores en el estrato número 2.

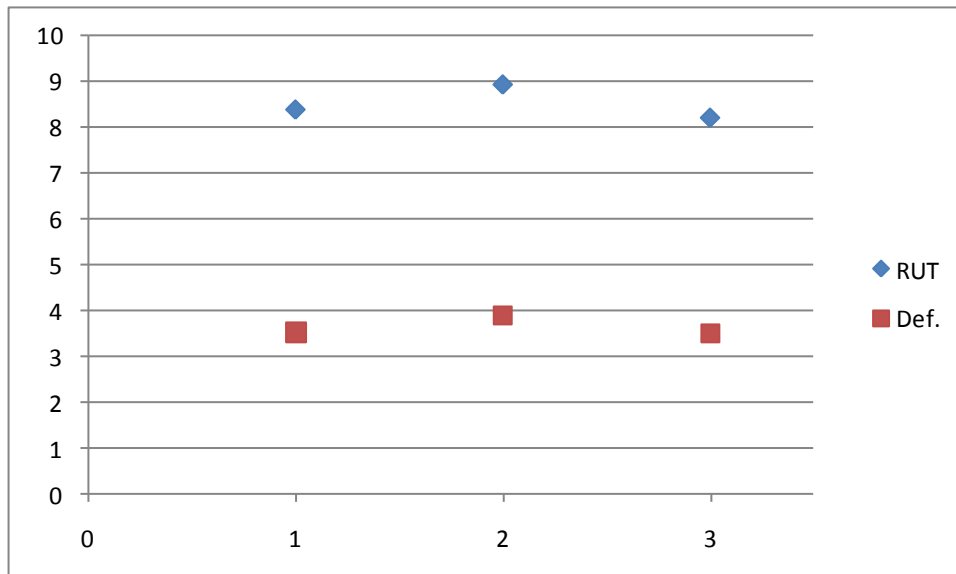


Figura 33. Relación de RUT y deformación con respecto a los estratos.

CONCLUSIONES

En promedio la resistencia última a la tensión de las fibras en términos textiles es para agaves de 5 años 8.95 N, para agaves de 7 años 8.57 N y para agaves de 9 años 7.93 N. El porcentaje de deformación en agaves de 5 años es 3.92%, en agaves de 7 años es 3.86% y en agaves de 9 años 3.15%; comportamiento cercano al henequén y sisal por lo que se puede clasificar comercialmente como una fibra dura.

Las fibras de las hojas del *Agave angustifolia* Haw tienen una estructura multicelular y no uniforme. Por lo tanto, si se incrementa la longitud de la fibra, el número de imperfecciones o puntos débiles aumentan, lo que resulta en una disminución en los valores de la resistencia última a la tensión y el porcentaje de deformación. El tipo de comportamiento elástico de las fibras de las hojas del *Agave angustifolia* Haw, cambia conforme la edad del agave es más maduro, además la descripción físico-matemática de este fenómeno viscoelástico la realiza el modelo de maxwell. En la resistencia última a la tensión así como en el porcentaje de deformación las fibras de las hojas de los agaves de 5 años presentan el valor más alto en comparación con las hojas de los agaves de 7 y 9 años.

REFERENCIAS

ASTM Standard Test D1059. Method for Yarn Number Based on Short-Length Specimens.

ASTM Standard Test D3822. Method for Tensile Properties of Single Textile Fibers

ASTM Standard Test D1774. Methods for Elastic Properties of Textile Fibers

ASTM D76. Standard Specification for Tensile Testing Machines for Textiles

Ayre B. G., Stevens K., Chapman K. D., Webber C. L., Dagnon K. L. y D'Souza N. A. (2009). Viscoelastic Properties of Kenaf Bast Fiber in Relation to Stem Age. *Textile Research Journal*, 79, 973.

Bird, R. B., Armstrong, R. C., y Hassager, O. (1987). *Dynamics of polymeric liquids*. Universidad Politécnica de Valencia.

Bodros, E., Baley, C. (2007). Study of tensile of stinging nettle fibres (*Urtica Dioica*). *Materials Letters*.

Cervera, R. M., Blanco, D. E. (2001). *Mecánica de estructuras 1. Resistencia de materiales*

Determination of strenght and elongation at traction break, simplified method, NFG 07-002, AFNOR, Paris, France (1985).

Esteve, A., Sumanasiri K.E.D. (2010). Development of natural fibre composites in Papua New Guinea (PNG).

Fibres et fils – analyse chimique, Fibers and wires-chemical analysis, normal atmosphere of packaging and textile testing, NF G003, AFNOR, Paris, France (1970).

Gomes, A., Goda, K., Ohgi, J. (2004). Effects of Alkali Treatment to Reinforcement en Tensile Properties Of Curaua Fiber Green Composites. *JSME International Journal*, 47 (4), 541.

González, J. L., y González, V. J. L., (1999). *Metalurgia mecánica*.

Jacob, J. M., Thomas, S. (2007). Biofibres and biocomposites. *Carboydrate Polymers*.

Justiz-Smith, N. G., Junior, V. G., E, B. V. (2007). Potential of Jamaican Banana, Coconut Coir and Bagasse Fibres as Composite Materials. *Materials characterization*.

Kulkarni, A. G., y Satyanarayana, K. G., Rohatgi, P. K. (1986). Mechanical properties of banana fibers (*musa sepientum*). *Journal of materials science*, 18, 2290-2296.

Mohsenin, N. N. (1986). *Physical properties of plant and animal materials. Structure, physical characteristics and mechanical properties*. New York: Gordon and Breach Science Publishers.

Mukherjee, P. S., y Satyanarayana, K. G. (1984). Structure and properties of some vegetable fibres. Part 1 Sisal fibre. *Journal of materials science*, 19, 3925-3934.

NMX-A-069-INNTEX-1990. Determinación de la carga de ruptura, tenacidad y al alargamiento por método de hilo individual.- Método de prueba. Normas Textiles Mexicanas.

Núñez, S. M. C., Méndez, M. M. G., y Solorza, F. J. (2001). *Introducción a la reología*. México: Instituto Politécnico Nacional.

Oudiani A., Sghaier B., M'sahli S., Chaabouni y Sakli F. (2009). Elastic Recovery and Viscoelastic Behavior of Agave americana L. Fibers. *Textile Research Journal*, 79, 166.

Painter, C. P., Coleman, M. M., Iruin, J. J.. (1996). *Fundamental de Ciencia de Polimeros*

Rao, K. M. M., y Rao, K. M., (2007). Extraction end tensile properties of natural fibers: vakka, date and bamboo. *Composite Structures* 77, 288-295.

Reddy, N., y Yang, Y. (2005). Biofibers from agricultural byproducts for industrial applications. *TRENDS in biotechnology*, 23(1), 22-27.

Satyanarayana, K. G., Ravikumar, K. K., Sukumaran, K., Mukherjee, S. G., Pillai, G. K., Y Kulkarni, A. G. (1986). Structure and properties of some vegetable fibres. Part 3 Talipot and Palmira fibres. *Journal of materials science*, 21, 57-63.

SIAP, y SAGARPA. (2009). Anuario estadístico de la producción agrícola. Obtenida en abril de 2011. <http://www.siap.sagarpa.gob.mx/>

Silva S. L., Caballero C. M. (2004) *Informe técnico final del proyecto de investigación: desarrollo de tecnologías adecuadas para el proceso de fabricación del mezcal en el estado de Oaxaca, clave cgpi: 20020524 – 20031488*.

Silva S. L., Hernández G. L. H., Caballero. C. M., y López. H. I. (2009). Tensile Strength of Fibers Extracted from the Leaves of the angustifolia Haw Agave in Function of their Length. *Journal of*

Applied Mechanics and Materials,15, 103-108.

Silva F. A., Chawla N., Toledo R. D. (2009). An experimental investigation of the fatigue behavior of sisal fibers. *Journal of materials science and engineering*, A 516, 90-95.

Tabilo, M. G. y Barbosa, C. G. (2005). Rheology for the food industry. *Journal of food engineering*, 67, 147-156.

Tomczak, F., Demétrio, S. T. H., y Satyanarayana, K. G. (2007). Studies on lignocellulosic fibers of Brazil. Part II. Morphology and properties of Brazilian coconut fibers. *Journal composites: Part A: applied science and manufacturing*, 38, 1710-1721.

Tomczak, F., Satyanarayana, K. G., y Demétrio, S. T. H., (2007). Studies on lignocellulosic fibers of Brazil. Part III. Morphology and properties of Brazilian curauá fibers. *Journal composites: Part A: applied science and manufacturing*, Article in press, 1-10.

Ya M. A., Isayer I. A., (2006). *Rheology Concepts, Methods, and Applications*. Toronto, Ontario, Canada.

ANEXO 1

PARTICIPACIÓN EN FABRICACIÓN DE PROTOTIPOS Y EVENTOS ESTATALES

En el siguiente apartado se anexa la constancia de participación en eventos estatales para difundir los resultados del trabajo y la fabricación en prototipos.



**INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR
DE SAN MIGUEL EL GRANDE**

SECRETARÍA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA
SEP

Otorga el presente

RECONOCIMIENTO

A: **Ing. Luis Alberto Ríos Santos**

Por haber impartido la Conferencia: **“Como innovar productos amigables con el medio ambiente en base a fibras naturales”** en el marco de la celebración de la XVI Semana de Ciencia y Tecnología.

San Miguel el Grande, Oax., 27 de Octubre de 2009.


INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR
DE SAN MIGUEL EL GRANDE
DIRECCION
M.C. Gerardo Raymundo Blanco Sarmiento
Director General del ITSMIGRA



Instituto Politécnico Nacional

Centro Interdisciplinario de Investigación para
el Desarrollo Integral Regional, Unidad Oaxaca

Otorga la presente

Constancia

A: Caballero Caballero Magdaleno, Silva Santos Luis,
Ríos Santos Luis Alberto

Por su presentación del cartel

Estudio de las propiedades reológicas de las fibras de hojas
del *Agave angustifolia* haw

Dentro del marco del XXVI Aniversario del CIIDIR Unidad Oaxaca, durante las "V Jornadas Politécnicas
de Investigación 2009".



INSTITUTO POLITÉCNICO
NACIONAL
CIIDIR-UNIDAD-OAXACA

Santa Cruz Xoxocotlán Oaxaca, 11 de noviembre de 2009

Dr. Juan Rodríguez Ramírez

Director



Fii OAXACA
2010

12° FORO ESTATAL DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN

La Comisión Estatal para la Planeación de la Educación Superior y la Comisión Estatal para la Planeación y Programación Media Superior

Otorgan el presente

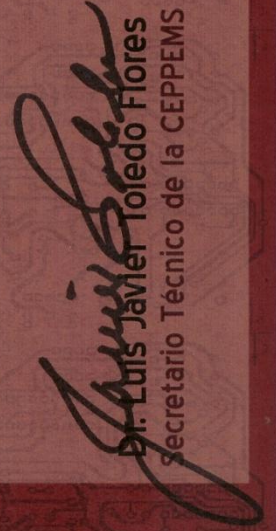
RECONOCIMIENTO

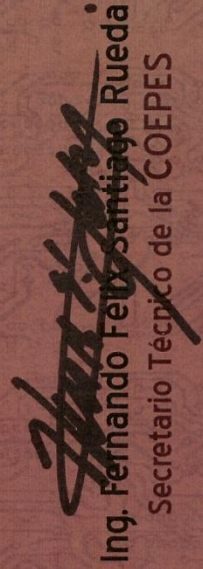
Luis Alberto Rios Santos,

A: Magdaleno Caballero Caballero
Luis Silva Santos

Por su participación como **PONENTE** en el 12° Foro Estatal de Investigación e Innovación.

Oaxaca de Juárez, Oax., 10 de diciembre 2010


Dr. Luis Javier Toledo Flores
Secretario Técnico de la CEPPEMS


Ing. Fernando Félix Santiago Rueda
Secretario Técnico de la COEPES



2010-2016





Instituto Politécnico Nacional

Centro Interdisciplinario de Investigación para
el Desarrollo Integral Regional, Unidad Oaxaca

Otorga la presente

Constancia

A: **Luis Ricardo Reyes Estévez, Enriquez Araujo Adrián, Cristobal, Pantaleón Bautista Xochilt, Martha Lorenzo Pérez Luis Alberto Ríos Santos, Luicita Lagunez Rivera**

Por su presentación del cartel

Extracción del Aceite Esencial del Laurel (*Laurus nobilis* L.) Por Hidrodestilación

Dentro del marco del XXVI Aniversario del CIIDIR Unidad Oaxaca, durante las "V Jornadas Politécnicas de Investigación 2009".

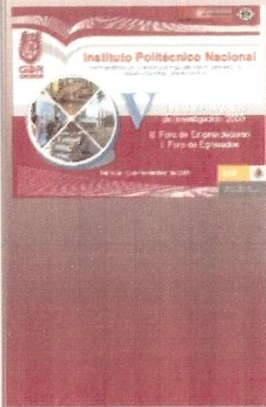
Santa Cruz Xoxocotlán Oaxaca, 11 de noviembre de 2009



Juan Rodríguez Ramírez

Dr. Juan Rodríguez Ramírez

Director



Santa Cruz Xoxocotlan, Oaxaca, Oax., a 23 de Julio de 2009.

Al Programa Institucional de Formación de Investigadores (PIFI)
del Instituto Politécnico Nacional

PRESENTE.

Por medio de la presente se hace constar que el **C. Luis Alberto Rios Santos**, becario del Programa Institucional de Formación de Investigadores (PIFI) del CIIDIR IPN Unidad Oaxaca participó en el diseño y fabricación del prototipo titulado **"Máquina de molienda por elementos de impacto articulados para el agave hidrolizado"**, trabajo realizado durante su participación en el proyecto de Investigación: **"Investigación y desarrollo tecnológico para el aprovechamiento de fuentes de energía no convencionales en procesos artesanales de baja escala"**, clave SIP: 20090624 en el periodo Febrero-Junio 2009, dicho alumno es estudiante de tiempo completo de la Maestría en Ciencias en Conservación y Aprovechamiento de Recursos Naturales, en Ingeniería.

Sin más por el momento, quedo de usted.

ATENTAMENTE



Dr. Magdaleno Caballero Caballero

Director del proyecto:

"Investigación y desarrollo tecnológico para el aprovechamiento de fuentes de energía no convencionales en procesos artesanales de baja escala"

Clave SIP: 20090624

ANEXO 2

PARTICIPACIÓN EN EVENTOS NACIONALES

En el siguiente apartado se anexa la constancia de participación en eventos nacionales para difundir los resultados del trabajo.



ANEXO 3

PARTICIPACIÓN EN EVENTOS INTERNACIONALES

En este último anexo se incluye la constancia de las participaciones derivadas en eventos internacionales, en donde se puntualizaron los resultados alcanzados.



Instituto Welte para Estudios Oaxaqueños

Emilio Carranza 203 • Colonia Reforma • Oaxaca, Oaxaca 68050
Tel/Fax: (951) 513-8323
E-mail: welte@prodigy.net.mx • Red mundial: <http://www.welte.org>

CONSTANCIA

Por este conducto se hace constar que

RIOS SANTOS, Luis A.

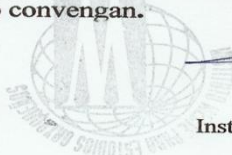
Presentó la ponencia:

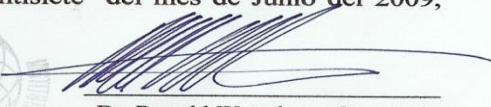
CABALLERO CABALLERO Magdaleno, Luis SILVA SANTOS, Luis A. RIOS SANTOS y Rey F. GARCÍA MÉNDEZ (CHDIR-Oaxaca). Diseño de una Desfibradora para Hojas de *Agave Angustifolia* Haw

en el

**OCTAVO SIMPOSIO INTERNACIONAL DE ESTUDIOS OAXAQUEÑOS,
25-27 de Junio, 2009**

Se extiende la presente constancia el día veintisiete del mes de Junio del 2009, para los fines que al interesado convengan.




Dr. Ronald Waterbury, Secretario
Instituto Welte para Estudios Oaxaqueños

