



**UNIVERSIDAD MICHOACANA
DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO**



FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

TÍTULO

**Estudio de la Fibra de Lirio Acuático (*Eichhornia crassipes*) Tratada Hidrotérmica
y Térmicamente**

**TESIS presentada por:
P.I.Q. SAMUEL GONZÁLEZ GÓMEZ**

**A LA FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA COMO REQUISITO PARA OBTENER
EL TÍTULO DE LA LICENCIATURA EN INGENIERÍA QUÍMICA**

Director de Tesis: Dr. Salomón Ramiro Vásquez García

Co-Directora: Nelly Flores Ramírez

Morelia, Michoacán, México. Junio 2018



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS
DE HIDALGO

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

Edificio M, Planta Baja, Ciudad Universitaria, Francisco J. Múgica S/N,
Colonia Felicitas del Río, Morelia, Michoacán, C.P. 58030.



Número de Oficio: 20/2018

**P. I. Q. GONZALEZ GOMEZ SAMUEL
P R E S E N T E**

En contestación a su atenta solicitud de fecha 29 de Mayo de 2018 me permito comunicarle a Usted, que se aprueba la opción de **Titulación por TESIS** propuesto para presentar Examen Recepcional en la Carrera de Ingeniero Químico.

El tema aprobado: **Estudio de la Fibra de Lirio Acuático (Eichhornia crassipes) Tratada Hidrotérmica y Térmicamente** el cual se desarrollará bajo el siguiente índice:

- RESUMEN
- I.- INTRODUCCIÓN (JUSTIFICACIÓN, OBJETIVO(S) E HIPÓTESIS)
 - II.- GENERALIDADES O MARCO TEÓRICO
 - III.- DESARROLLO DEL TRABAJO (METODOLOGÍA)
 - IV.- ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS
 - V.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES
- REFERENCIAS

Además deberá ajustarse al artículo 39 y 41, y podrá contemplar los puntos necesarios del artículo 40 de la reglamentación interno de la Facultad de Ingeniería Química en su capítulo VI.

Para tales efectos fungirá como **asesor(a) el(la) DR. VASQUEZ GARCIA SALOMON RAMIRO** Profesor(a) de la Facultad de Ingeniería Química y como **asesor(a) externo(a) el(la) Dra. Nelly Flores Ramírez** de Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera. La mesa de jurado para revisión y realización de este trabajo estará integrada por:

DR. VASQUEZ GARCIA SALOMON RAMIRO
M. C. NIETO LEMUS LUIS
DR. CHAVEZ PARGA MA. DEL CARMEN
DR. MARTINEZ CINCO MARCO ANTONIO
M. C. MARIN LAZARO ARNULFO

PRESIDENTE 0200142-0
VOCAL 1 8600122-1
VOCAL 2 0700100-2
SUPLENTE 1 0200140-3
SUPLENTE 2 8201407-8

ATENTAMENTE

Morelia, Mich. A 29 de Mayo de 2018.

DIRECTOR DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA





FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

PROGRAMA ACREDITADO



Morelia, Michoacán, a 06 de junio de 2018.

DRA. MA. DEL CARMEN CHÁVEZ PARGA
DIRECTORA
DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA DE LA UMSNH
PRESENTE

Atendiendo a sus indicaciones se hizo la revisión de manuscrito de **TESIS** presentada por el P.I.Q.
SAMUEL GONZÁLEZ GÓMEZ CON MATRÍCULA 0960717A

Creemos que es de aceptarse dicho manuscrito con las modificaciones sugeridas verbalmente al interesado.


DR. VÁSQUEZ GARCÍA SALOMON RAMIRO
PRESIDENTE 02001420


M.C. NIETO LEMUS LUIS
VOCAL 86001221


DRA. CHÁVEZ PARGA MA. DEL CARMEN
VOCAL 07001002





FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

PROGRAMA ACREDITADO



No. Oficio 624/2017/2018
Morelia, Michoacán, a 6 de junio de 2018
Asunto: Autorización de Impresión de Tesis

LIC. ULISES GUTIÉRREZ VÁZQUEZ
JEFE DEL DEPARTAMENTO DE TITULACIÓN
DE LA UNIVERSIDAD MICHOACANA
P R E S E N T E.

Por este medio, me estoy permitiendo transcribir a esa Sección de Certificación a su digno cargo la comunicación enviada a esta Dirección por la mesa de jurado de examen Recepcional de esta fecha y que a la letra dice:

Atendiendo a las indicaciones, se hizo la revisión de manuscrito de **Tesis** presentado por el pasante de Ingeniera Química: **Samuel González Gómez** con matrícula **0960717A**.

Creemos que es de aceptarse dicho manuscrito con las modificaciones sugeridas verbalmente al interesado: ENTERADOS:

DR. VÁSQUEZ GARCÍA SALOMON RAMIRO
M.C. NIETO LEMUS LUIS
DRA. CHÁVEZ PARGA MA. DEL CARMEN

02001420
86001221
07001002

Comunico a Usted lo anterior para los fines legales a que haya lugar.

ATENTAMENTE


DRA. MA. DEL CARMEN CHÁVEZ PARGA
DIRECTORA
DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA DE LA UMSNH



Resumen

Estudio de la Fibra de Lirio Acuático (*Eichhornia crassipes*) Tratada Hidrotérmica y Térmicamente

SAMUEL GONZÁLEZ GÓMEZ

Director: Dr. Salomón Ramiro Vásquez García
Co-Directora: Nelly Flores Ramírez

La *Eichhornia crassipes* conocido como lirio acuático es un problema ambiental por su excesivo crecimiento, lo que provoca la contaminación de ríos, lagos y lagunas; pero su retiro de estos ecosistemas representa un alto costo, debido a lo cual, se ha considerado en base a su composición química desarrollar tecnologías para su aprovechamiento. El lirio acuático está constituido principalmente de celulosa, hemicelulosa y lignina. En base a lo anterior, el presente estudio considera caracterizar las fibras de la raíz del lirio cuando ellas son tratadas térmica (FNTT) e hidrotérmicamente (FNTH). De esta manera se empleó la espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR), análisis termogravimétrico (TGA), calorimetría diferencial de barrido (DSC) y pruebas de resistividad eléctrica, con lo cual se determinó que las FN (fibras naturales), FNTT y FNTH poseen los grupos funcionales característicos de la celulosa, hemicelulosa y lignina comercial. Adicionalmente, en los análisis termogravimétricos se observó que las degradaciones de la FN y FNTT se comportan de manera similar, no así para la FNTH la cual perdió más masa de manera más rápida a un mismo rango de temperatura. Sin embargo, hasta los 200°C, las tres fibras bajo análisis presentaron igual estabilidad térmica. Por DSC se observó la disgregación de fases entre los compuestos que constituyen a la fibra. Finalmente, resistividad eléctrica aumentó para FNTT y FNTH en comparación con la fibra natural, siendo más notorio el aumento para la FNTH. Con estas características se puede deducir que las fibras de lirio acuático sometidas a tratamiento hidrotérmico se pueden utilizar para el refuerzo de matrices poliméricas para aplicaciones de aislamiento eléctrico y que presentan una disociación importante entre sus componentes que la hacen altamente biodegradable.

Palabras clave: Análisis, termogravimétrico, Fibra, Lirio Acuático, Resistividad.

Abstract

The (*Eichhornia crassipes*) known as water lily is an environmental problem due to its excessive growth, which causes the contamination of rivers, lakes and lagoons; but its withdrawal from these ecosystems represents a high cost, due to which, it has been considered based on its chemical composition to develop technologies for its use. The water lily is made up mainly of cellulose, hemicellulose and lignin. Based on the above, the present study considers characterizing the lily root fibers when they are treated thermally (FNTT) and hydrothermal (FNTH). In this way, Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR), thermogravimetric analysis (TGA), differential scanning calorimetry (DSC) and electrical resistivity tests were used, which determined that FN (natural fibers), FNTT and FNTH possess the functional groups characteristic of cellulose, hemicellulose and commercial lignin. Additionally, in the thermogravimetric analyzes it was observed that the degradations of the FN and FNTT behave in a similar way, not so for the FNTH which lost more mass more quickly at the same temperature range. However, up to 200 ° C, the three fibers under analysis showed equal thermal stability. By DSC, phase disintegration was observed between the compounds that constitute the fiber. Finally, electrical resistance increased for FNTT and FNTH compared to natural fiber, with the increase being more noticeable for FNTH. With these characteristics it can be deduced that water lily fibers subjected to hydrothermal treatment can be used for the reinforcement of polymeric matrices for electrical insulation applications and that they have an important dissociation between their components that make them highly biodegradable.

Índice

Resumen	vii
Abstract	viii
Lista de tablas	v
Lista de figuras	vi
Nomenclatura	viii
Agradecimientos	ix
Dedicatorias	x
Glosario	xi
Capítulo 1. Introducción	1
1.1 Generalidades	1
1.2 Objetivo	3
1.2.1 Objetivo General	3
1.2.2 Objetivos Específicos	3
1.3 Justificación	4
1.4 Hipótesis	4
Capítulo 2. Marco Teórico	5
2.1. Polímeros	5
2.2. Clasificación de polímeros por su origen	5
2.2.1. Polímeros Sintéticos	5
2.2.2 Polímeros Naturales	6
2.3. Clasificación de los polímeros según su estructura química	6
2.3.1 Polímeros lineales	6
2.3.2 Polímeros ramificados	7

2.3.3 Polímeros entrecruzados	7
2.3.4 Polímeros reticulados	7
2.4 Fuerzas de atracción entre las cadenas poliméricas	7
2.4.1 Fuerzas intramoleculares	8
2.4.2 Fuerzas intermoleculares	8
2.5 Celulosa	8
2.6 Hemicelulosa	9
2.7 Lignina	10
2.8 Métodos de caracterización	11
2.8.1 Espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR)	11
2.8.2 Análisis Termogravimétrico (TGA)	12
2.8.3 Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC)	12
2.8.4 Pruebas de Resistencia Eléctrica	12
Capítulo 3. Metodología	14
3.1 Obtención de la fibra del lirio acuático	14
3.2 Fibra natural de raíz del lirio acuático (FN)	15
3.3 Fibra natural sometida a un tratamiento hidrotérmico (FNTH)	15
3.4 Fibra natural con tratamiento térmico (FNTT)	16
3.5 Equipos	16
3.5.1 Microscopio óptico	16
3.5.2 Espectroscopia Infrarroja por transformada de Fourier (FTIR)	16
3.5.3 Análisis termogravimétrico (TGA/ DSC)	17
3.5.4 Análisis de la resistividad eléctrica	18
3.5.5 Estufa de secado	19
Capítulo 4. Resultados	20

4.1 Microscopia Óptica (MO)	20
4.2 Caracterización por FTIR	21
4.2.1 Espectroscopia FTIR de la raíz de lirio acuático (FN)	21
4.2.2 FTIR de fibras con tratamientos hidrotérmicos, 2 y 24 h. (FNTH2, FNTH24)	22
4.2.3 FTIR de fibras con tratamientos térmicos, 50 - 200°C (FNTH50, FNTH200)	23
4.2.4 Calculo de áreas bajo la curva en los espectros FTIR	24
4.3 Análisis termogravimétrico (TGA) y derivada (DTGA)	26
4.3.1. TGA/DTGA fibra natural (FN)	26
4.3.2. TGA/DTGA de FN con tratamiento hidrotérmico por 24 h. (FNTH24)	28
4.3.3. TGA/DTG para la fibra tratada a 200°C (FNTH200)	30
4.4 Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC).	35
4.4.1. DSC de la fibra natural (FN)	35
4.4.2. DSC de FN con tratamiento hidrotérmico por 24 h. (FNTH24)	36
4.4.3. DSC de FN con tratamiento térmico a 200°C (FNTH200)	37
4.5 Pruebas de Resistencia Eléctrica	39
4.5.1 Mediciones de la resistencia Eléctrica	39
4.5.2 Cálculo de Resistividad	39
5. Conclusiones	43
Recomendaciones	44
Bibliografía	45

Lista de tablas

Tabla 1: Áreas bajo la curva del espectro FTIR de la FN, FNTH y FNTT.....	25
Tabla 2 Régimen de degradación térmica y reducción de masa FN, FNTH24 y FNTT200.	32
Tabla 3: Régimen térmica y reducción de masa FN, FNTH24 y FNTT200.....	38
Tabla 4: Mediciones de resistencia eléctrica para cada muestra.....	39
Tabla 5: Calculo de resistividad presentada por las muestras FN, FNTH y FNTT.....	38

Lista de figuras

Fig. 1: Conformación de un polímero con su respectivo monómero.	5
Fig.2: Clasificación estructural de los polímeros a) Polímero lineal, b) ramificado, c) entrecruzado y d) reticulado.	7
Fig.3: Estructura de la Celulosa.....	9
Fig. 4: Estructura química primaria de la celulosa.....	9
Fig. 5: Estructura química de la lignina.	10
Fig. 6: Alcoholes cinamílicos precursores de la lignina.	11
Fig. 7: Esquema de absorciones IR.....	11
Fig.8 Clasificación de materiales según su resistividad [27].....	13
Fig. 9: Muestra de lirio recolectada.	14
Fig. 10: Raíz de lirio acuático separada del resto de la planta.....	14
Fig.11: Deshidratación de la raíz en estufa isotérmica.	15
Fig. 12: Proceso de tratamiento térmico de las fibras en un equipo Soxhlet.	15
Fig.13: Microscopio óptico.	16
Fig. 14: Equipo Perkin Elmer Spectrum 400.....	17
Fig.15: Equipo STA 449 F3 Júpiter.	17
Fig.16: Estufa isotherm Vacuum Oven Modelo 282A.....	19
Fig.17: visualización óptica a 40x para las fibras, a) FN b) FNTH2, c) FNTH4, d) FNTH8, e) FNTH24, f) FNTH50, g) FNTH100, h) FNTH150, i) FNTH200.....	20
Fig.18: Espectro FTIR de FN.	22
Fig. 19: Espectro FTIR para las fibras FNTH y ampliación de la señal OH.	23
Fig. 20: Espectro FTIR para las fibras FNTH y ampliación de la señal OH.....	24
Fig.21: TGA de la FN.....	26

Fig.22: DTGA de la FN.....	27
Fig.23: TGA de FNTH24	28
Fig.24: DTGA de FNTH24.	29
Fig.25: TGA de FNTT200.	30
Fig.26: DTGA de FNTT200.	31
Fig.27: TGA comparativo entre FN, FNTH24 y FNTT200.....	33
Fig.28: DTGA comparativo para FN, FNTT200 y FNTH24.	34
Fig.29: DSC de la FN.	35
Fig.31: DSC de FNT200.	38
Fig.32 Grafico resistividad ($M\Omega$) vs de tiempo de tratamiento hidrotérmico (horas) para tres voltajes suministrado a las FNTH.....	41
Fig.33: Grafico resistividad ($M\Omega$) vs temperatura de tratamiento térmico ($^{\circ}C$) para tres voltajes suministrado a las FNTT.....	42

Nomenclatura

FN: Muestra de fibra natural sin tratamientos térmicos ni hidrotérmico en equipo Soxleth.

FNTH: Fibra con tratamiento hidrotérmico (lavado, 100°C) en equipo Soxleth con agua destilada a diferentes tiempos.

FNTT: Fibra con tratamiento térmico por una hora en una estufa a diferentes temperaturas.

FNTH2: Muestra de fibra con tratamiento hidrotérmico de 2 horas.

FNTH4: Muestra de fibra con tratamiento hidrotérmico de 4 horas.

FNTH8: Muestra de fibra con tratamiento hidrotérmico de 8 horas.

FNTH24: Muestra de fibra con tratamiento hidrotérmico de 24 horas.

FNTT50: Muestra de fibra con tratamiento térmico a 50°C por una hora.

FNTT100: Muestra de fibra con tratamiento térmico a 100°C por una hora.

FNTT150: Muestra de fibra con tratamiento térmico a 150°C por una hora.

FNTT200: Muestra de fibra con tratamiento térmico a 200°C por una hora.

Agradecimientos

“Es que puedes tener todas las

Virtudes del mundo pero si no

Tienes gente en el camino que

Te ayude no sirve de nada.

“Linedine Lidane ”

A mi hermano Francisco sin tu apoyo esto no hubiera sido posible, gracias por estar siempre que te he necesitado sabes que cuentas conmigo siempre.

A mi hermanos Emanuel, María, Felipe, Pablo, David, Daniel, Reyes, Francisco, (somos muchos) gracias a todos por su gran apoyo, esta tesis tiene mi nombre pero es trabajo de todos.

A mi padre por ser un ejemplo en mi vida.

A Jatziri Yunuen por estar a mi lado en todo momento, mejor compañera no pude elegir.

A la familia García Cortes

Al Dr. Salomón R. Vázquez García por guiarme en cada momento durante la realización de este trabajo, compartírtelo su conocimiento, reciba mi respeto y admiración.

A los integrantes de mi mesa sinodal.

M.C. Luis Nieto Lemus.

Dra. Ma. Del Carmen Chávez Parga.

A los compañeros del laboratorio de polímeros, Lupita, Martha, Ulises, Vianey gracias por su ayuda muchachos.

A todos los maestros que han sido parte de mi vida académica.

Dedicatorias

La presente tesis está dedicada a Dios, a mi madre que aunque ya no está con nosotros desde el cielo siempre nos cuida a mí y a mis hermanos, a mi hermano francisco ya que sin su apoyo esto no fuera posible, a mi padre por sus consejos, a mis hermanos que siempre ha estado a mi lado brindándome su apoyo y sus consejos para hacer de mí una mejor persona, a Yunuen por brindarme su apoyo y cariño siempre, y a mis sobrinos que son uno de mis más grandes motores para salir adelante, a mis profesores durante toda mi vida académica, a mis amigos y compañeros que de alguna u otra forma han contribuido para el logro de mis objetivos.

Glosario

Morfología: estructura de un organismo o sistema y sus respectivas características.

Polímero: macromoléculas formadas por la unión mediante enlaces covalentes de una o más unidades simples llamadas monómeros.

Biogás: combustible que se genera por la biodegradación de la materia orgánica.

Monómero: molécula simple, generalmente de bajo peso molecular, que forma cadenas lineales o ramificadas de dos o tres unidades.

Maleza: conjunto de plantas que crecen muy juntos entrecruzando y enredando sus ramas de manera que dan lugar a una gran espesura.

Fitorremediación: conjunto de tecnologías que reducen in situ o ex situ la concentración de diversos compuestos a partir de procesos bioquímicos realizados por las plantas y microorganismos asociados a ellas

Biodegradabilidad: característica que presentan algunos productos o sustancias la cual les permite descomponerse en elementos químicos naturales por la acción de agentes biológicos como el sol, las plantas o los animales.

Molécula: agrupación definida y ordenada de átomos que constituye la porción más pequeña de una sustancia pura y conserva todas sus propiedades.

Capítulo 1. Introducción

1.1 Generalidades

El lirio acuático (*Eichhornia crassipes*) es originario de Brasil, fue introducido por el hombre a Norteamérica y al resto de los continentes, lo que ha extendido su amplia diseminación en los últimos cien años. En la actualidad esta planta es considerada como una de las principales malezas acuáticas del mundo[1]. Está constituida por un tejido de polisacáridos estructurales como celulosa y hemicelulosa, lignina, además de extractivos acuosos (compuestos inorgánicos y azúcares no estructurales) y extractivos en fenol (clorofila, ceras y otros componentes menores como xantofilas) [2].

Es una planta que en condiciones óptimas de crecimiento puede duplicar la superficie cubierta y su masa en 7 y 30 días respectivamente, tolera variaciones importantes de temperatura, concentración de nutrientes y del pH, por lo que, se le considera una plaga. Dentro de los problemas ecológicos que se han presentado por la acumulación de grandes cantidades de lirio en los mantos de agua, está la disminución del oxígeno disuelto (por consiguiente la muerte de las especies acuáticas), adicionalmente el lirio constituye un hábitat para el desarrollo de organismos vectores de enfermedades como la filariasis, helmintiasis, dengue, encefalitis, paludismo y fiebre amarilla, entre otras[3]

Debido a todos los problemas que implica el lirio acuático, existen varios métodos para su eliminación de los mantos acuíferos siendo el más importante la utilización de equipos mecánicos que lo recolectan y desechan a las orillas, en otros casos cuando el crecimiento es más rápido se utilizan técnicas basadas en el control químico con herbicidas [4, 5].

En recientes años se han realizado varios estudios a las plantas de lirio acuático con el propósito de determinar diversas propiedades que puedan ser utilizadas de manera favorable, de tal forma que el lirio no sea considerado como una plaga indeseada. Estos estudios han estimado que el lirio acuático tiene una gran capacidad de absorción de metales, por su alto contenido y diversidad de polisacáridos, haciéndolo, una materia prima para diversas aplicaciones, entre las que destacan la producción de biocombustibles (biogás y bioetanol)[6, 7], la obtención de polisacáridos con

aplicaciones en la industria de los alimentos. Es también una fuente para la obtención de lignina, además, debido a su capacidad de biorretención, ha sido empleada en sistemas de purificación biológica o fitorremediación para mejorar la calidad del agua[8, 9]. Otros usos han sido la elaboración de productos artesanales como papel, tejidos y aglomerados similares a la madera entre otros[10].

La planta de lirio acuático se compone de tres partes fundamentales: hoja, tallo y raíz, las cuales han sido objeto de estudio ya sea por si solas o mezcla de algunas de ellas dando como resultado principalmente que sus composiciones químicas sean muy similares con una pequeña variación en porcentaje [11].

La mayor parte de los estudios se basa en el uso del tallo y la hoja para realizar los análisis ya que estos representan la mayor cantidad de masa total de la planta, siendo esta de un 80-85 por ciento en peso, por otro lado la raíz representa una fracción menor en la planta, la cual, es un 15-20 por ciento en peso[12]. Esta última fracción del lirio es de gran interés ya que la raíz, presenta una relación de composición molecular que la activa en el proceso de absorción de metales pesados como el Mn, Zn, Pb y Cd entre otros[3, 13].

Así, el presente trabajo se realizó la caracterización de la raíz de lirio acuático proveniente del lago de Cuitzeo, en el estado de Michoacán. La caracterización física - química de las fibras se realizó mediante análisis óptico, electrónico, espectroscópico, térmico y eléctrico., con el propósito de determinar si la fibra de raíz del lirio tiene la capacidad de ser empleada como refuerzo en matrices poliméricas en materiales conductores; así como ser una barrera física para absorber metales contaminantes.

1.2 Objetivo

1.2.1 Objetivo General

Caracterización física y química de las fibras de la raíz de lirio acuático mediante análisis, óptico, espectroscópicos, térmicos y eléctricos, para determinar su capacidad de ser empleadas como refuerzo en matrices poliméricas.

1.2.2 Objetivos Específicos

1. Obtener tres fibras naturales (FN) de raíz del lirio acuático; una FN deshidratada molida (fibra natural, FN), otra FN sometida a tratamientos hidrotérmicos (FNTH) y una FN sometida a tratamientos térmicos (FNTT), para ser empleadas en los análisis comparativos.
2. Determinar los grupos funcionales presentes en los tres tipos fibras de la raíz del lirio acuático (FN, FNTH, FNTT) a través de un análisis por espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR), para valorar las fibras presentes y establecer con los grupos funcionales su afinidad química a algunas matrices.
3. Categorizar las características térmicas de los tres tipos fibras de la raíz del lirio acuático a través de un estudio por pérdida de peso llevada a cabo por TGA/DTGA, para conocer su resistencia térmica.
4. Identificar las transiciones térmicas de los tres tipos fibras, por medio del DSC, con el fin de describir las fibras presentes a través de sus temperaturas de fusión.
5. Determinar la resistividad eléctrica de los tres tipos fibras, a través de un MegOhmMeter, para conocer su utilidad como fibra aislante.

1.3 Justificación

Actualmente el lirio acuático es indeseable ya que favorece al desarrollo de organismos vectores de enfermedades y disminuye el oxígeno disuelto en el agua impidiendo el crecimiento de la vida acuática. Por lo tanto, se remueve como una estrategia de eliminación, en otro sentido se han analizado sus propiedades y posibles aplicaciones por ser una fuente natural de lignina. En este último sentido, este trabajo pretende aportar conocimientos específicos sobre las raíces del lirio acuático, debido a que esta fracción podría ser importante en el refuerzo de materiales poliméricos un medio conductor y como un medio para la absorción de metales pesados.

1.4 Hipótesis

Las raíces del lirio acuático constituidas de celulosa, hemicelulosa y lignina tienen, la capacidad de absorber metales pesados. Tomando en cuenta esto, se esperaría que su estructura, relación de fibras y grupos funcionales sean aptas para incrementar las propiedades mecánicas, conductividad y capacidad de absorción de metales de matrices poliméricas.

Capítulo 2. Marco Teórico

2.1. Polímeros

La palabra polímero proviene de griego poli (muchos)- meros (parte), es una sustancia donde las moléculas son múltiplos de unidades de moléculas de bajo peso molecular. Estas unidades pequeñas que se une entre sí, son los monómeros, formados principalmente por el carbono e hidrogeno [14].

La longitud de la cadena del polímero es especificada por el número de unidades que se repiten en la cadena, indicado como grado de polimerización. Así, el peso molecular del polímero es el producto del peso molecular del monómero y el grado de polimerización. Es frecuente que los polímeros posean pesos moleculares de 100.000 g/mol o mayores. Los materiales con un alto grado de polimerización se denominan altos polímeros, en otro sentido, los polímeros con bajo peso molecular se denominan oligómeros [15].

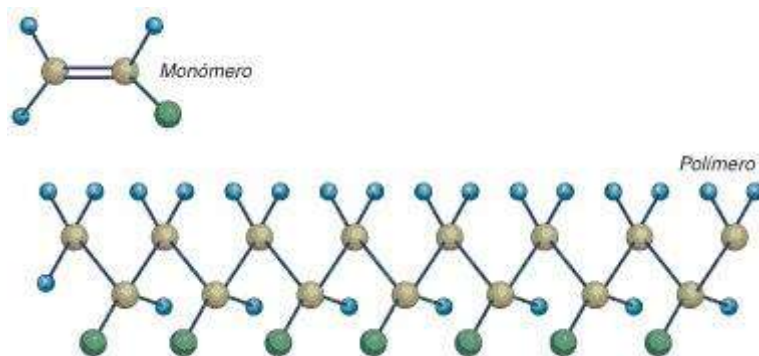


Fig. 1: Conformación de un polímero con su respectivo monómero.

2.2. Clasificación de polímeros por su origen

De acuerdo al origen los polímeros se clasifican en dos clases: Naturales y Sintéticos.

2.2.1. Polímeros Sintéticos

Son los que se obtienen de procesos de polimerización controlados por el hombre a partir de materias primas de bajo peso molecular, dentro de este tipo de polímeros está

el nylon, polietileno, cloruro de polivinilo, etc. En general, son el resultado de modificaciones mediante procesos químicos realizados en el laboratorio [15, 16].

2.2.2 Polímeros Naturales

Los polímeros naturales son aquellos sintetizados biológicamente por la naturaleza y que se obtiene de planta o animales. En este tipo de polímeros esta la seda, lana, celulosa, que han tenido una muy amplia aplicación a lo largo de la historia [17]. Generalmente los polímeros naturales son obtenidos por extracción a partir de la biomasa (celulosa, gelatina, almidón, etc.), por síntesis química a partir de monómeros obtenidos de biomasa o bien producidos por microorganismos [15]

La ventaja de utilizar polímeros naturales radica en su biodegradabilidad y en muchas ocasiones su fuente de extracción son desechos o subproductos de la industria agrícola alimentaria, lo cual baja su costo a un residuo o subproducto industrial[18].

2.3. Clasificación de los polímeros según su estructura química

La estructura química indica la constitución molecular, y estudia el efecto de la naturaleza de los átomos que la forman, los sustituyentes, las uniones entre los monómeros, el peso molecular; así como, el efecto de las ramificaciones o entrecruzamientos en la cadena principal. De acuerdo a la estructura molecular los polímeros se clasifican como polímeros lineales, ramificados, entrecruzados o reticulados[19].

2.3.1 Polímeros lineales

Las unidades monoméricas están unidas unas a otras formando cadenas sencillas con flexibilidad para unirse entre sí por fuerzas de Van Der Waals, o enlaces polares principalmente.

2.3.2 Polímeros ramificados

Son aquellos donde la cadena principal está conectada lateralmente con otras cadenas secundarias.

2.3.3 Polímeros entrecruzados

Cadenas lineales adyacentes se unen transversalmente en varias posiciones mediante enlaces covalentes, así como se incorporan átomos o moléculas a la cadena.

2.3.4 Polímeros reticulados

En este tipo de polímeros las unidades monoméricas trifuncionales que tienen tres enlaces covalentes activos, esto forma una red tridimensional por la unión de las diferentes cadenas poliméricas.

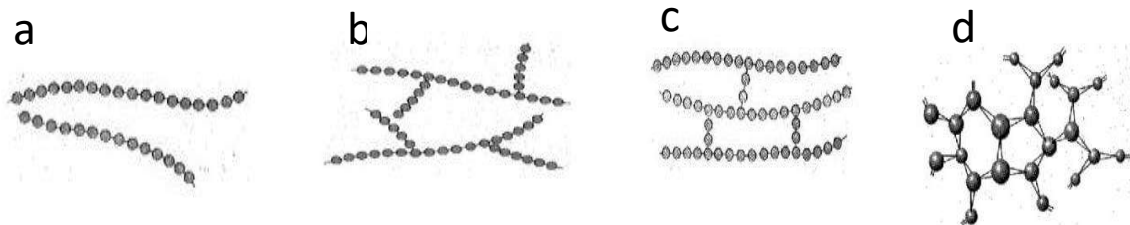


Fig.2: Clasificación estructural de los polímeros a) Polímero lineal, b) ramificado, c) entrecruzado y d) reticulado.

2.4 Fuerzas de atracción entre las cadenas poliméricas

La estructura física se refiere al ordenamiento de unas moléculas respecto a otras. Hace referencia a la orientación y cristalinidad, que dependen en gran medida de la estructura química.

2.4.1 Fuerzas intramoleculares

Los átomos se unen estableciendo agrupaciones permanentes porque existen fuerzas atractivas entre ellos que los mantienen unidos. Estas fuerzas atractivas son capaces de formar un enlace químico que mantienen unidos a los átomos o a los iones que forman las sustancias químicas (elementos y compuestos) y se conocen como fuerzas intramoleculares.

2.4.2 Fuerzas intermoleculares

Son las fuerzas que existen entre las diferentes moléculas de un compuesto, estas son las responsables de que exista el estado líquido y sólido. Entre las moléculas de un gas no existen fuerzas intermoleculares. Los puntos de ebullición de las sustancias dan la magnitud de las fuerzas intermoleculares que actúan entre ellas. Para que una sustancia pase del estado líquido al estado gaseoso se debe suministrar suficiente energía para superar las fuerzas de atracción entre las moléculas. El mismo principio se aplica al punto de fusión de las sustancias.

2.5 Celulosa

Descubierta en 1838 por Anselme Payen, es un polímero lineal compuesta por haces de microfibras donde las cadenas de celulosa se estabilizan lateralmente por interacciones hidrogeno intra-intermoleculares [20]. La celulosa es el polímero natural más abundante y una materia prima para la producción de combustibles líquidos y gaseosos, así como también se utiliza para diferentes procesos industriales. Es el componente principal de las paredes celulares de las plantas y el hidrato de carbono más ampliamente extendido.

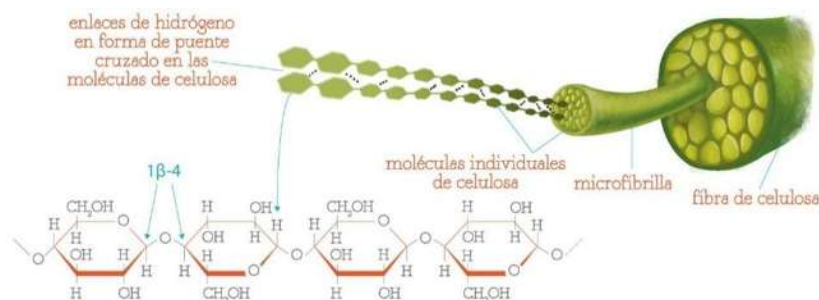


Fig.3: Estructura de la Celulosa.

La celulosa forma largas cadenas debido a la fluctuante ordenación especial de los puentes de hidrógeno, que se unen en forma de haz [21].

La celulosa se forma por la unión de moléculas de β -glucopiranosas mediante enlaces β -1,4-O-glucosídico. El anillo de piranosas está en conformación C1, es decir, que los grupos $-\text{CH}_2\text{OH}$ y $-\text{OH}$, así como los enlaces glucosídicos, están en posición ecuatorial con respecto al plano medio del anillo, y los átomos de hidrógeno en posición axial. Cuando la molécula de celulosa está completamente extendida y toma forma de cinta aplanada, con los grupos $-\text{OH}$ sobresaliendo lateralmente, se pueden formar puentes de hidrógeno inter e intramoleculares. La superficie de la cinta, compuesta por átomos de hidrógeno unidos directamente a carbono, es hidrofóbica. Estas dos características de la estructura molecular son las responsables de su estructura supramolecular, y determina muchas de las propiedades físicas y químicas de la celulosa.

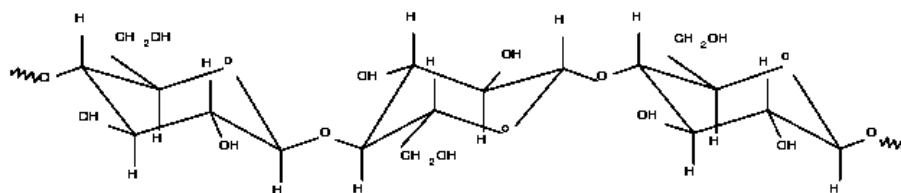


Fig. 4: Estructura química primaria de la celulosa.

2.6 Hemicelulosa

La hemicelulosa es uno de los polisacáridos que constituyen la parte principal de los componentes esqueléticos de las paredes celulares de las plantas y se parecen a la celulosa, aunque son más solubles y se extraen y descomponen con más facilidad, conocidos como carbohidrato complejo y heterogéneo ya que su estructura posee diferentes polímeros como pentosas (xilosa y arabinosa), hexosas (manosa, glucosa y

galactosa), azúcar y ácidos, entrelazadas entre sí glucosídicamente. Muchas de ellas, en la degradación hidrolítica, dan junto a glucosa, manosa, galactosa, la hemicelulosa sirve de conexión entre la lignina y las fibras de celulosa y da toda la rigidez a la red de celulosa, hemicelulosa y lignina[22].

2.7 Lignina

Es la tercera fracción mayoritaria de la biomasa lignocelulósica. La definición estructural de la lignina nunca ha sido tan clara como la de otros polímeros naturales tales como la celulosa y proteínas, debido a la complejidad que afecta su aislamiento, análisis de la composición, y la caracterización estructural. El problema de una definición precisa para la lignina se asocia con la naturaleza de sus múltiples unidades estructurales, las cuales no suelen repetirse de forma regular, dado que la composición y estructura de la lignina varían dependiendo de su origen y el método de extracción o aislamiento utilizado[23].

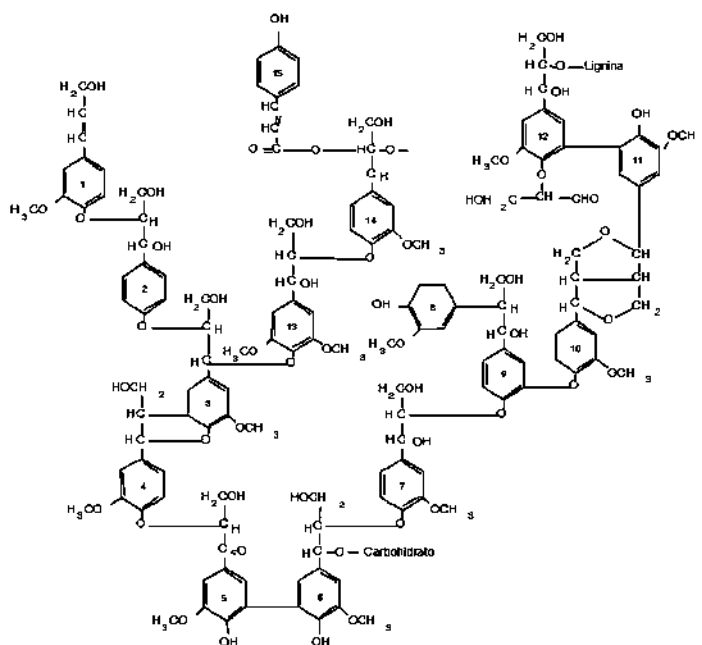


Fig. 5: Estructura química de la lignina.

Los monómeros que forman la lignina son los denominados alcoholes cinamílicos, diferenciados entre sí por las diferentes sustituciones que presenta el anillo aromático.

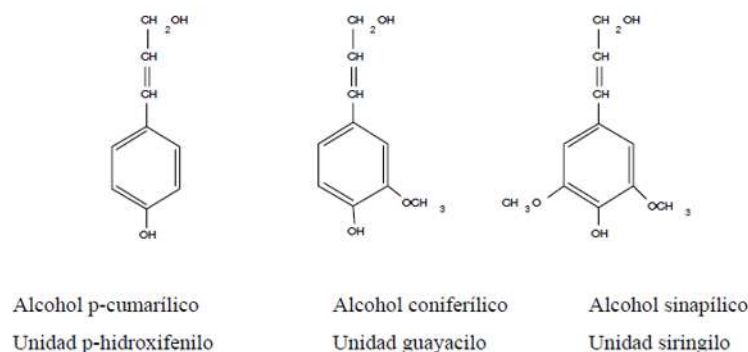


Fig. 6: Alcoholes cinamílicos precursores de la lignina.

La proporción de las tres unidades que forman la lignina y el tipo de enlace difiere según el tipo de planta, así como del grupo taxonómico, tejido o capa de la pared celular, estado de desarrollo y condiciones ambientales.

2.8 Métodos de caracterización

2.8.1 Espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR)

El espectro infrarrojo informa de la composición química, impurezas, interacciones entre sustituyentes y análisis de grupos funcionales, entre otros. Este análisis determina las interacciones o cambios estructurales en diversos materiales por la absorción a determinada energía de vibración (estiramiento y deformación) de los enlaces químicos presentes en la estructura molecular y al hacerlo absorbe a longitudes de onda características para cada tipo de enlace, cuantificando el número de enlaces presentes. Así cada compuesto tiene un espectro característico donde las absorciones corresponden a determinadas vibraciones de los enlaces presentes; siendo un análisis cualitativo y cuantitativo, al cuantificar una sustancia en una mezcla compleja [24].

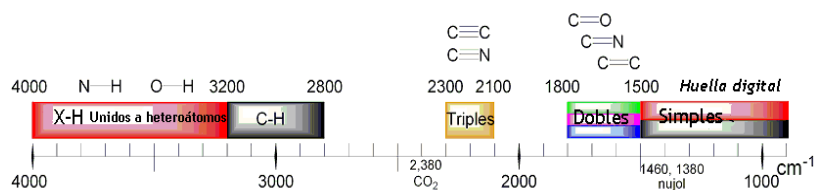


Fig. 7: Esquema de absorciones IR.

2.8.2 Análisis Termogravimétrico (TGA)

El análisis termogravimétrico (TGA) indica la cantidad de masa presente en una muestra mientras esta es expuesta a un programa controlado de incremento térmico. Cualquier variación de la masa está asociada a un cambio químico que da un cambio en la composición. En este análisis, la muestra es colocada en un horno y suspendida en una balanza de precisión, para analizar su cambio de peso a una temperatura de interés o se somete a un calentamiento programado obteniendo una curva TGA. Así, se conoce cuantitativamente el cambio de masa asociado a la deshidratación, descomposición, u oxidación de un polímero con un tiempo y a una temperatura. Las curvas TGA son características de un polímero y los cambios en la masa resultan de la ruptura y/o formación de varios enlaces químicos y físicos a altas temperaturas, originando la evaporación de productos volátiles o la formación de productos de reacción más pesados [24],[25].

2.8.3 Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC)

La calorimetría diferencial de barrido (DSC) analiza las transiciones de fase (un cambio físico por una emisión o absorción de calor), e identificar cualitativa y cuantitativamente los que presentan alta sensibilidad a los cambios de entalpía (~ 0.01 J/g) y tamaños de muestra muy pequeños (aproximadamente de 10 mg.). El DSC mide la diferencia entre el flujo de calor suministrado a una muestra y el suministrado a una referencia, ambas expuestas al mismo programa térmico[24].

2.8.4 Pruebas de Resistencia Eléctrica

Todo cuerpo se opone al paso de la corriente eléctrica, porque los electrones rozan con los átomos del material por el cual circulan. Al disminuir este rozamiento menor será la resistencia. Así, la resistencia eléctrica indica la oposición al paso de la corriente eléctrica; así, un conductor es un material de baja resistencia al flujo de corriente una conductividad mayor a 10^2 S/cm (1×10^{-10} M Ω *m). Por lo que, un aislante es un material de una resistencia al flujo de corriente eléctrica muy elevada en el orden de 10^{-12} S/cm (1×10^6 M Ω *m). En estos términos un semiconductor es un material capaz de conducir la electricidad, pero en menos medida que el conductor (1×10^{-10} - 1×10^6 M Ω *m)[26],[27].

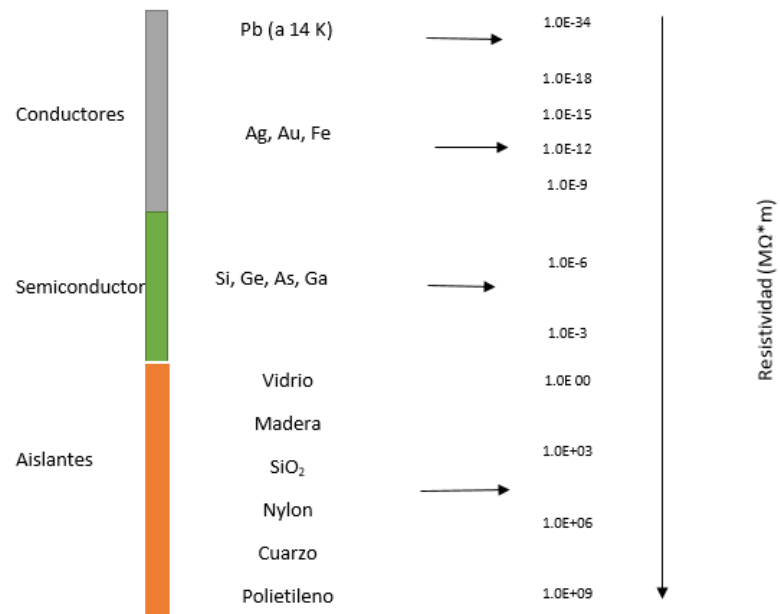


Fig.8 Clasificación de materiales según su resistividad [27].

Capítulo 3. Metodología

3.1 Obtención de la fibra del lirio acuático

El lirio acuático se recolectó en el lago de Cuitzeo (latitud 19.9347 longitud -101.1399) que se localiza en el valle del Eje Neovolcánico de México, mayormente en el estado de Michoacán, con una menor área en el estado de Guanajuato.



Fig. 9: Muestra de lirio recolectada.

De las muestras recolectadas, se seleccionaron las plantas de tamaño similar para hacer constante esta característica y no afectar los resultados obtenidos. Después se realizó la separación de tallo, raíz y hoja, de las cuales se realizó el estudio únicamente a la raíz.



Fig. 10: Raíz de lirio acuático separada del resto de la planta.

Una vez separada la raíz, esta se lavó con agua destilada y se llevó a deshidratación mediante un secado en estufa a una temperatura constante de 60 °C y a vacío por un lapso de 48 h, hasta obtener un peso constante de raíz seca.



Fig.11: Deshidratación de la raíz en estufa isotérmica.

3.2 Fibra natural de raíz del lirio acuático (FN)

La raíz seca se pulverizó en un molino de cuchillas hasta obtener un polvo fino, a este polvo fino se le nombró fibra natural sin tratamiento (FN).

3.3 Fibra natural sometida a un tratamiento hidrotérmico (FNTH)

Unos gramos de fibra secada (FN) se llevaron a un equipo Soxhlet en un tratamiento hidrotérmico con agua destilada a tiempos de 0, 2, 4, 8 y 24 horas.



Fig. 12: Proceso de tratamiento térmico de las fibras en un equipo Soxhlet.

3.4 Fibra natural con tratamiento térmico (FNTT)

Unos gramos de fibra natural (FN) se sometió a un tratamiento térmico en una estufa para analizar su comportamiento al aumentar la temperatura, los tiempos de permanencia para cada muestra fueron de una hora y las temperaturas a las que se sometieron fueron de 25, 50, 100, 150 y 200 °C.

3.5 Equipos

3.5.1 Microscopio óptico

Las fotografías fueron tomadas en un microscopio óptico LEICA GZ6 en la facultad de tecnología de la madera con resolución de 10 a 100X.



Fig.13: Microscopio óptico.

3.5.2 Espectroscopia Infrarroja por transformada de Fourier (FTIR)

La caracterización por Espectroscopia Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR) se llevó a cabo a temperatura ambiente y presión atmosférica; utilizando un equipo Perkin Elmer Spectrum 400 con un rango de onda de 650 a 4000 cm^{-1} por medio de reflectancia total atenuada (ATR). Las muestras analizadas fueron las fibras obtenidas de los tratamientos tanto térmico como hidrotérmicos.



Fig. 14: Equipo Perkin Elmer Spectrum 400

3.5.3 Análisis termogravimétrico (TGA/ DSC)

El análisis termogravimétrico para TGA se realizó en un equipo STA 449 F3 Júpiter en un rango de temperaturas de 50 a 600 °C, utilizando un peso de 5.793 mg de fibra colocada en un crisol de aluminio con tapa perforada para la obtención de los termogramas. Se utilizó una atmosfera inerte de nitrógeno con una velocidad de calentamiento de 5 °C/ min.

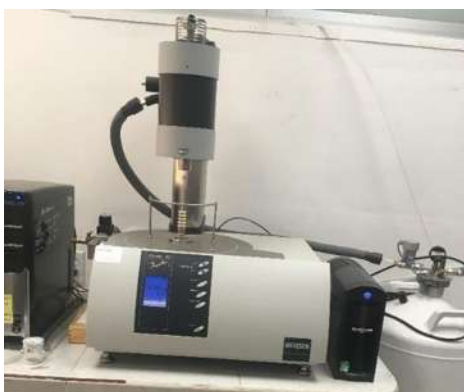


Fig.15: Equipo STA 449 F3 Júpiter.

3.5.4 Análisis de la resistividad eléctrica

Las mediciones de la resistividad eléctrica se desarrollaron en un MegOhmMeter 1520 de Fluke. Este instrumento mide la resistencia del aislamiento térmico y es capaz también de medir la tensión y de comprobar conexiones con la función Lo-Ohms, el cual cuenta con tres tensiones de salida para la comprobación de la resistencia de aislamiento: 250, 500 y 1000 V.

Para realizar la prueba se compactaron las muestras de fibra obteniendo pastillas y analizándolas con el equipo. Con los datos de resistencia se calcula la resistividad eléctrica dado que esta nos da la fuerza de resistencia al paso de la corriente eléctrica solamente del material independientemente de la longitud y área de la muestra.

Se utiliza la ecuación 1:

$$\rho = \frac{RA}{L} \quad 1$$

Donde:

ρ = Resistividad eléctrica en $M\Omega \text{ m}$,

R= Resistencia medida con el equipo en $M\Omega$,

A = Área transversal de la muestra en m^2

L = Longitud de la muestra en m

3.5.5 Estufa de secado

La estufa isotherm Vacuum Oven Modelo 282A con una capacidad de calentamiento de 250 °C se utilizó para el secado de las raíces del lirio acuático, así como para realizar el tratamiento térmico que llevo a la obtención de las FNTT, (temperaturas de 25, 50, 100, 150 y 200 °C por 1 hora).



Fig.16: Estufa isotherm Vacuum Oven Modelo 282A

Capítulo 4. Resultados

4.1 Microscopia Óptica (MO)

La Figura 17 muestra las imágenes obtenidas por microscopia óptica a un aumento de 40X de la fibra de lirio natural (FN) (Figura 17a). También se muestra la fibra natural sometida a tratamientos hidrotérmicos (FNTH) por 2, 4, 8 y 24 horas (Figura 17b, c, d, e); y de la fibra natural que se sometió a tratamientos térmicos de 50, 100, 150 y 200°C (Figura 17f, g, h, i).

En la Figura 17a, se observa la heterogeneidad del tamaño de las fibras; así, coexisten fibras de tamaños diversos, en ellas se observan estructuras altamente definidas. Sin embargo, cuando las fibras son sometidas a tratamientos hidrotérmicos (Figura 17b, c, d, e), estas presentan un alto grado de aglomeración, como es el caso más evidente de la muestra FNTH8 (Figura 17d), donde el alto grado de dilución, disgregación fibrilar e hinchamiento, es consecuencia de la residencia de la muestra en el medio acuoso.

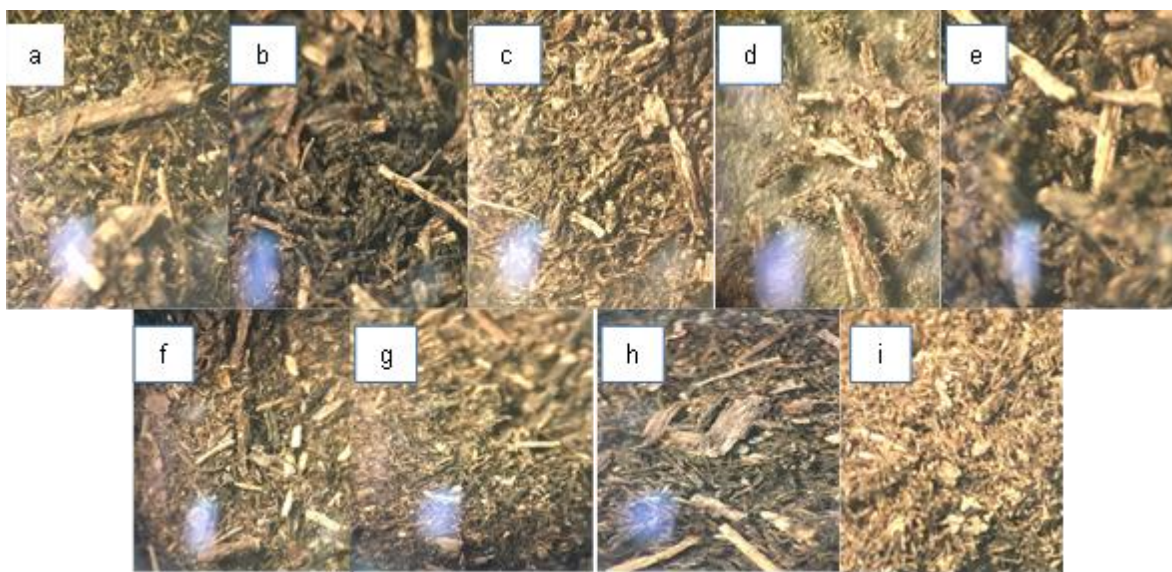


Fig.17: visualización óptica a 40x para las fibras, a) FN b) FNTH2, c) FNTH4, d) FNTH8, e) FNTH24, f) FNTH50, g) FNTH100, h) FNTH150, i) FNTH200.

Las fibras sometidas al tratamiento térmico (FNTT), no muestran mayores diferencias respecto a la fibra original Figura 17a (FN). Estas estructuras son de tamaño diverso y solo la Figura 17i muestra un alto grado de reducción de tamaño de partícula. El color no es un indicativo del proceso del tratamiento sobre la fibra ya que existieron varios contrastes de iluminación durante el proceso de la impresión fotográfica.

4.2 Caracterización por FTIR

Se realizaron las caracterizaciones por espectroscopia FTIR de las fibras de lirio acuático naturales(FN), con tratamientos hidrotérmicos (FNTH), así como aquellas que se sometieron al tratamiento térmico (FNTT), para conocer los grupos funcionales presentes en las fibras, y asociar las modificaciones generadas por los tratamientos por tratamientos hidrotérmicos y térmico realizados a las fibras.

4.2.1 Espectroscopia FTIR de la raíz de lirio acuático (FN)

La Figura 18 muestra el espectro FTIR de la raíz de lirio acuático natural (FN), que no recibió tratamientos térmicos ni sometida a tratamientos hidrotérmicos, para identificar los principales grupos funcionales que la componen la fibra.

Se distingue la banda ancha de absorción a 3319 cm^{-1} debido a las vibraciones de estiramiento de los OH que se encuentran presentes en la muestra, y la banda de 2916 cm^{-1} correspondiente a las vibraciones de estiramiento de los grupos CH y CH_2 , mientras que el pico a 1616 cm^{-1} es asignado al grupo C=O. La banda 1419 cm^{-1} indica los grupos H-CH y O-CH en el plano de vibración de flexión. Las bandas de vibración de 1320 cm^{-1} , 1247 cm^{-1} y 1154 cm^{-1} fueron debidas al CH_2 y C-O-C de estiramiento asimétrico del enlace glucosídico. Finalmente el pico a 1018 cm^{-1} corresponde a la vibración de flexión –C-O [28].[25] [29].

A partir del espectro FTIR del FN se establece que la fibra posee las señales típicas de un polisacárido, con un alto número de enlaces C-O, O-H y grupos C=O, y aquellos grupos asimétricos C-O-C que corresponden al grupo β -glucosídico.

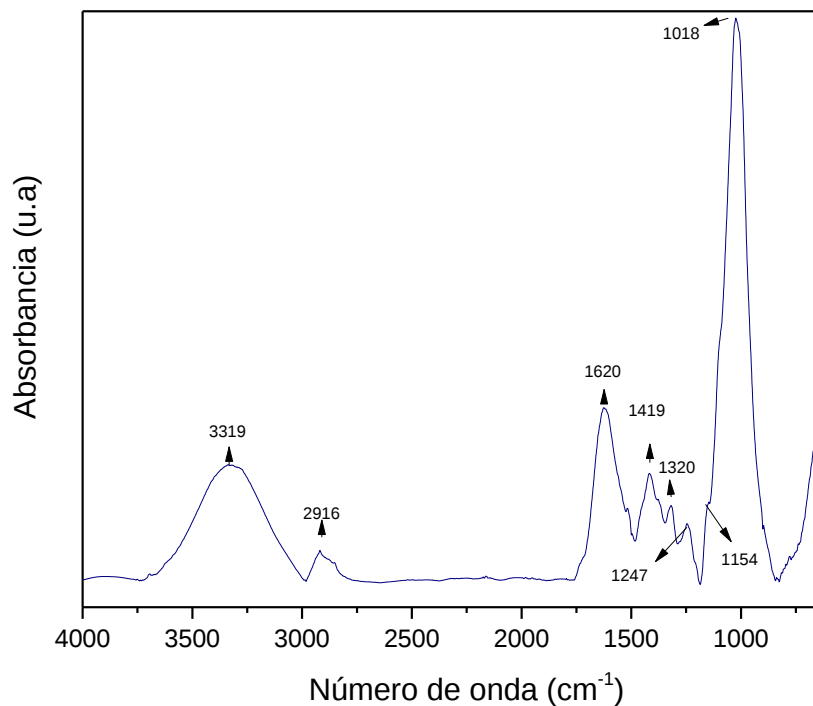


Fig.18: Espectro FTIR de FN.

4.2.2 FTIR de fibras con tratamientos hidrotérmicos, 2 y 24 h. (FNTH2, FNTH24)

En la Figura 19 se presentan los espectros FTIR realizados a las fibras que se sometieron a tratamientos hidrotérmicos en el equipo SOXHLET, donde se puede observar que la fibra no sufre cambios significativos, los grupos OH se mantienen constantes de igual forma para los CH. Sin embargo, se observa una pérdida de grupos C=O que le atribuye a la pérdida extractivos acuosos principalmente los compuestos inorgánicos, azúcares no estructurales, sustancias nitrogenadas entre otros [11],[2].

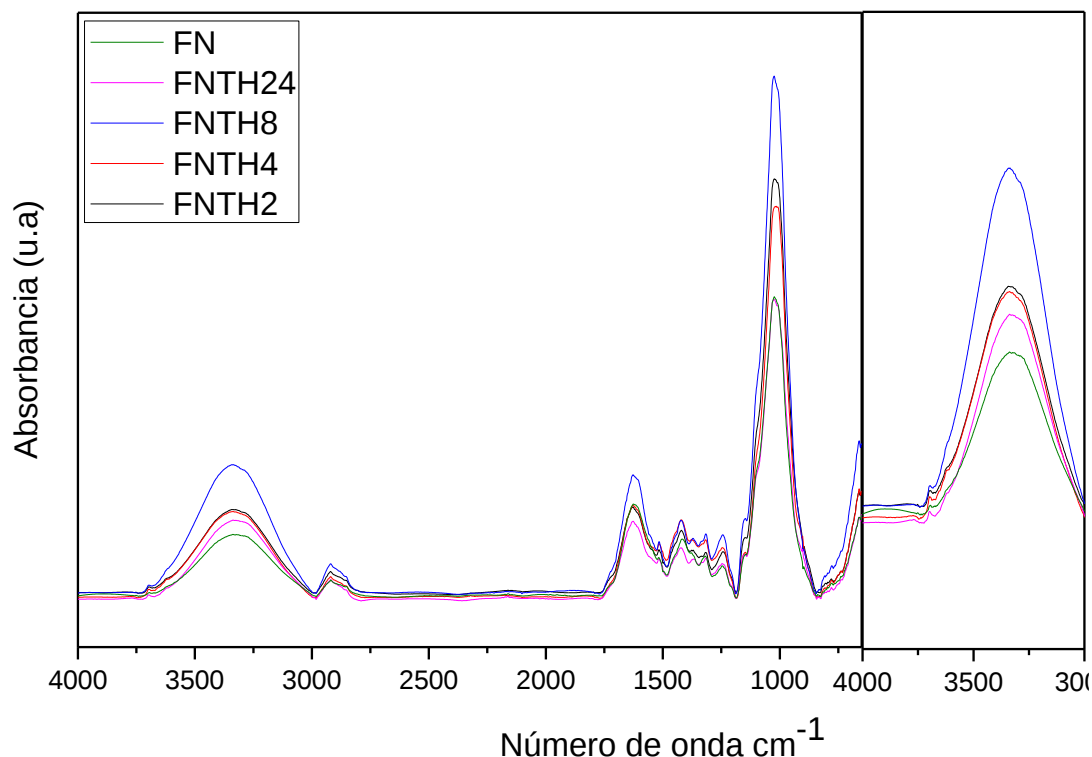


Fig. 19: Espectro FTIR para las fibras FNTH y ampliación de la señal OH.

4.2.3 FTIR de fibras con tratamientos térmicos, 50 - 200°C (FNTH50, FNTH200)

Los espectros FTIR realizados a las muestras que se sometieron a tratamiento térmico se muestran en la Figura 20. Al observar un decremento significativo de las señales de los grupos OH, se analizó de manera separada en un recuadro presentado a la derecha de grafica principal. En el agrupamiento general comparativo de espectros se observa una disminución en la banda de los OH, esto debido a que con la temperatura y la humedad del ambiente se liberan estos grupos como moléculas de agua en el caso del grupo C=O estos se mantienen constantes al igual que los grupos metilenos.

En base a los resultados anteriores se puede indicar que las fibras son funcionalmente estables hasta una temperatura de 200°C. Solo disminuyo de manera progresiva moléculas que contiene grupos OH como son las moléculas de agua.

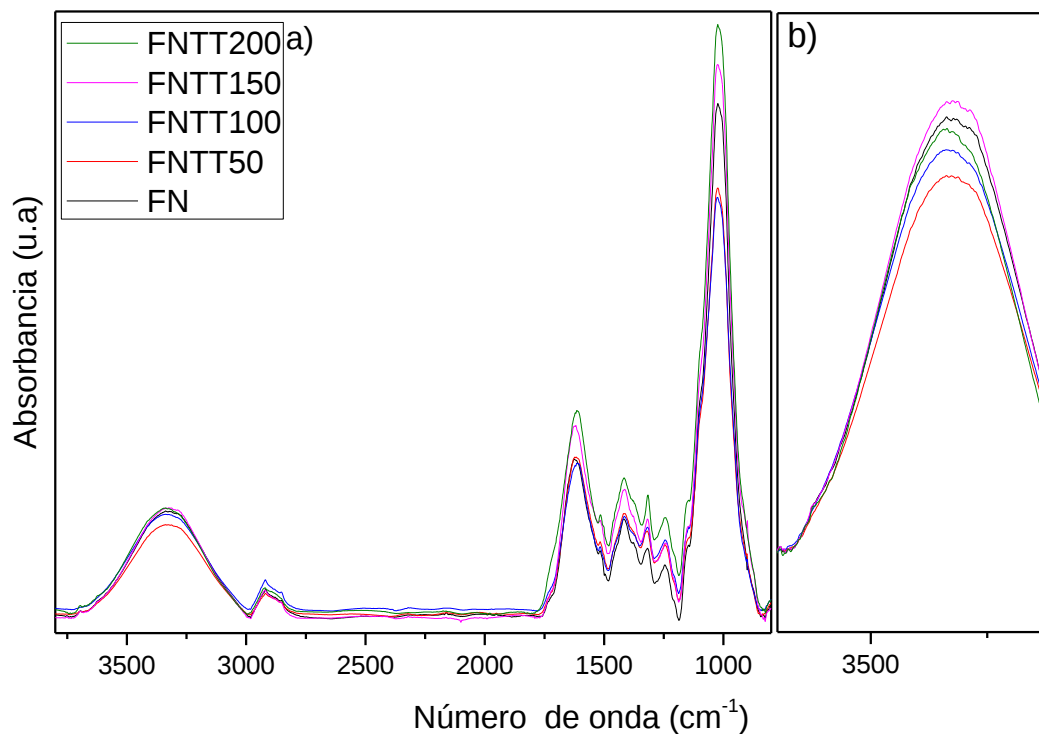


Fig. 20: Espectro FTIR para las fibras FNTT y ampliación de la señal OH.

4.2.4 Calculo de áreas bajo la curva en los espectros FTIR

Para corroborar los datos obtenidos de los FTIR se calcularon las áreas bajo la curva de cada uno de las señales representativas del espectro, así como también las relaciones de los grupos OH/CH y C=O/ CH para analizar si existían variaciones en relación a la disminución o aumento de estos dos grupos funcionales.

En la Tabla 1 se observan las señales para el caso de la FNTH. Se observa que el grupo OH se mantiene constante, sin embargo el grupo C=O presenta una disminución de aproximadamente un 30% esto debido a la perdida de extractivos acuosos. Por otra parte, para FNTT se observa que el grupo OH presenta una disminución de aproximadamente un 26%, como consecuencia de la perdida de moléculas de agua absorbida.

Tabla 1: Áreas bajo la curva del espectro FTIR de la FN, FNTH y FNTT.

Muestra	1 OH	2 CH, CH ₂	3 C=O	4 $\frac{\text{OH}}{\text{CH, CH}_2}$	5 $\frac{\text{C}=\text{O}}{\text{CH, CH}_2}$
FN	7.2229	0.4490	4.20176	16.08592 : 1	9.3576 : 1
FNTH2	10.2577	0.7546	4.3294	13.5929 : 1	5.7370 : 1
FNTH4	10.9727	0.7454	4.804	14.7215 : 1	6.4446 : 1
FNTH8	15.7270	0.9752	5.5535	16.1270 : 1	5.6947 : 1
FNTH24	9.6480	0.5985	3.8928	16.1205 : 1	6.5043 : 1
FNTT25	7.2229	0.4490	4.2018	16.0859 : 1	9.3576 : 1
FNTT50	6.4715	0.4481	4.5458	14.4433 : 1	10.1455 : 1
FNTT100	6.6229	0.5243	4.0814	12.6321 : 1	7.7847 : 1
FNTT150	7.9786	0.5832	5.6662	13.6800 : 1	9.7153 : 1
FNTT200	7.9601	0.6663	6.3488	11.9462 : 1	9.5280 : 1

Como resultado de los análisis de variaciones de señales del FTIR, se determinó que la FN tiene cambios significativos al ser sometida a procesos de tratamientos hidrotérmicos (FNTH) por la pérdida de extractivos. Así, existe un incremento respecto al tiempo de los grupos OH's en un valor de 18.59% (de FNTH2 a FNTH24), lo que posiblemente es el resultado de la escisión hidrolítica del enlace C-O-C (enlace glucosídico) formando grupos C-OH.

En el caso del FNTT, el tratamiento térmico genera una pérdida de grupos OH's, lo que representa un decremento porcentual del 25.73% (de FNTT25 a FNTT200), que sale de la fibra en forma de agua, los grupos funcionales restantes quedan constantes hasta 200 °C.

4.3 Análisis termogravimétrico (TGA) y derivada (DTGA)

4.3.1. TGA/DTGA fibra natural (FN)

La Figura 21 corresponde al TGA de la fibra FN (sin tratamiento térmico ni hidrotérmico), el cual indica la pérdida de masa porcentual respecto al incremento de la temperatura ($^{\circ}\text{C}$). Para la FN se observan tres disminuciones de masa significativas a medida que se incrementa la temperatura en un rango de temperatura de 25 a 600°C en atmosfera de N_2 ,

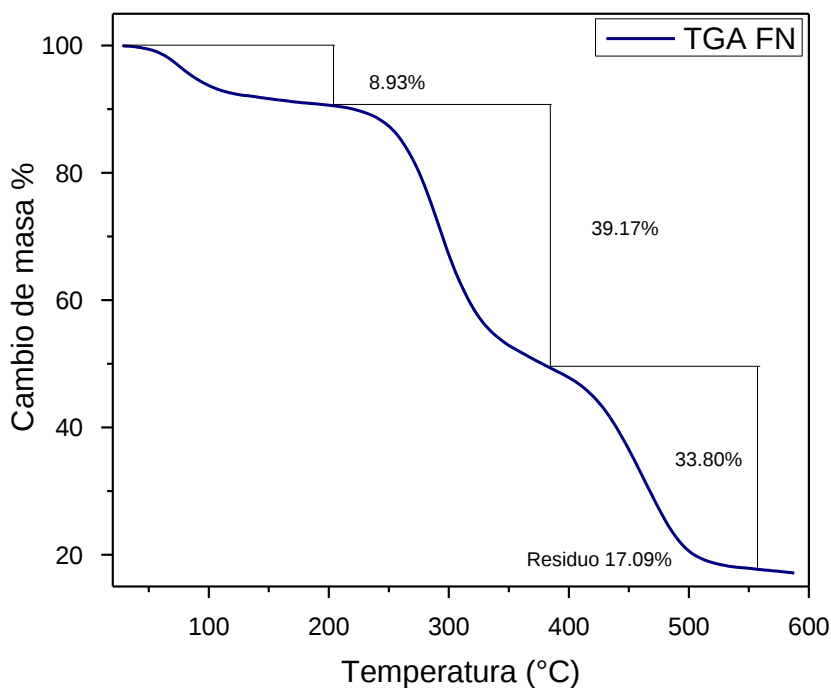


Fig.21: TGA de la FN.

Para analizar estos decrementos en el rango de 25 a 600°C con más detalle y límites de los mismos, se realizó la derivada de esta curva DTGA, la cual se observa en la Figura 22. Así, la Figura 22, muestra la curva de DTGA de la fibra natural, también con tres disminuciones de masa significativa. Para estudiar la pérdida de masa el comportamiento fue dividido en tres etapas individuales de $60\text{-}110^{\circ}\text{C}$, $200\text{-}350^{\circ}\text{C}$ y $380\text{-}540^{\circ}\text{C}$.

La primera pérdida de masa fue de 8.93%, así como la temperatura se elevó de 25°C a 110°C debido a la eliminación de agua libre. Este decremento fue máximo a 73°C.

En una segunda etapa, la FN presenta una reducción en masa próxima a los 39.17% cuando la temperatura se incrementa de 200°C a 350°C, debido a la evaporación de agua hidroscofia, así como el agua constitucional.

La pérdida de agua en la segunda etapa, fue máxima a 291°C y fue debida al agua constituyente de las moléculas. En esta misma etapa la disminución de masa (entre 200-350°C) registra un régimen de degradación térmica, donde unidades monoméricas se separan de las cadenas principales con motivo de la escisión térmica en lo enlaces -C-O-C- de la unión glucosídica. Estas son unidades terminales de la cadena, las cuales presentan un mayor movimiento respecto a las unidades monoméricas interiores.

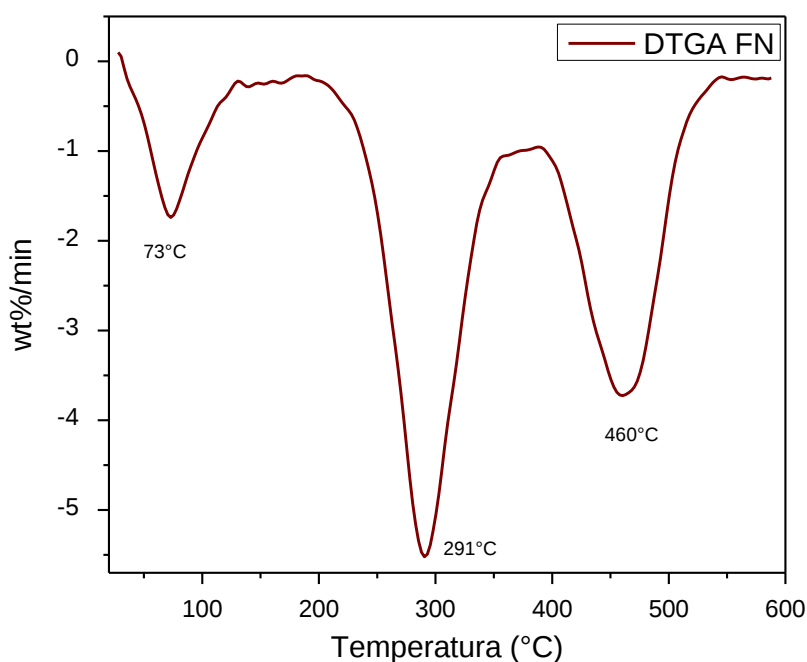


Fig.22: DTGA de la FN.

En la tercera etapa (de 380°C a 540°C), existe una disminución de masa de 33.80% debido a la degradación térmica que presenta las cadenas poliméricas, la cual fue máxima a 460°C. Es importante indicar que las altas temperaturas a las cuales se degrada la muestra se deben a la naturaleza cristalina de las cadenas, que la hacen menos susceptible la eliminación térmica: Así se produjo una baja cantidad de

compuestos volátiles con un requerimiento de mayor energía. Este régimen redujo el peso molecular de las cadenas. La masa residual de FN fue de 17.09%

4.3.2. TGA/DTGA de FN con tratamiento hidrotérmico por 24 h. (FNTH24)

La Figura 23 corresponde al TGA de la muestra sometida a un tratamiento hidrotérmico con agua destilada por 24 horas (FNTH24), en este caso se observan tres pérdidas en masa, en un rango de temperatura de 25 a 600°C.

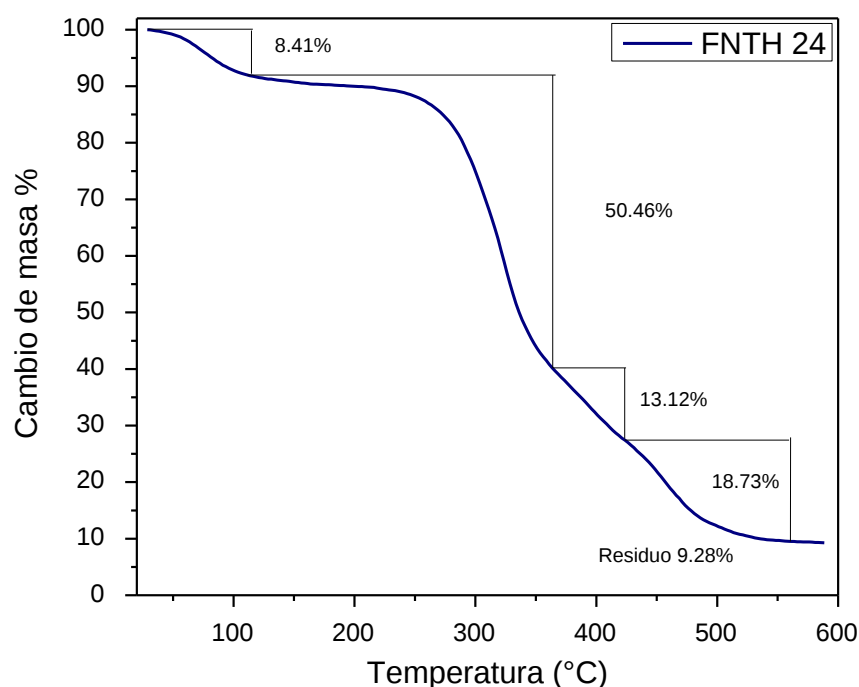


Fig.23: TGA de FNTH24

La Figura 24 corresponde al DTGA de la fibra sometida a un tratamiento hidrotérmico por 24 horas con agua destilada (FNTH24), en esta se observa que las disminuciones de masa que varían en cuatro etapas (no en tres como se observa con el TGA). Estas cuatro etapas individualmente son: 70-110°C, 230-360°C, 369-420 y 420-500°C.

La primera pérdida de masa es por la eliminación de agua libre por el incremento de la temperatura de 70°C a 110°C, en esta etapa hubo un decremento en masa de 8.41% el cual fue máximo a 70°C. Este valor máximo de 70°C contra 73°C de la muestra de FN,

indica una ligera mejoría en la salida del agua libre de FNTH24 respecto a FN (3°C de diferencia).

En la etapa II, la FNTH24 presenta una reducción en masa próxima a los 50.46% cuando la temperatura se incrementa de 230°C a 360°C. Esta pérdida de masa fue debida a la eliminación de agua higroscópica, así como el agua constitucional. El decremento máximo fue máximo a 323°C y fue debido al agua constituyente de las moléculas.

Para la etapa III, la FNTH24 presenta una reducción en masa próxima a los 13.02% cuando la temperatura se incrementa de 369°C a 420°C. Esta pérdida de masa fue debida al fraccionamiento de las cadenas poliméricas por efecto de la temperatura sobre el enlace glucosídico generando cadenas poliméricas de menos peso molecular, lo que indica que el proceso de tratamiento hidrotérmico vuelve más vulnerables reacciones de reducción de tamaño molecular a cause de la temperatura. El decremento máximo fue máximo a 394°C.

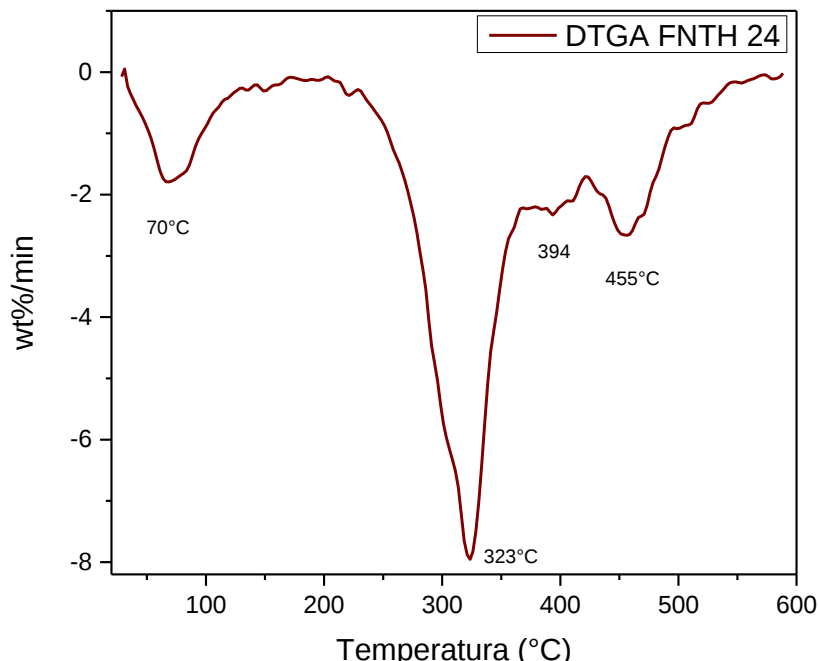


Fig.24: DTGA de FNTH24.

En la cuarta etapa (de 420°C a 500 °C), existe una disminución de masa de 18.73% debido a la degradación térmica que presentan las cadenas poliméricas, la cual fue

máxima a 455°C. En comparación con FN, las fibras de FNTH24 son más susceptibles al rompimiento de los enlaces glucosídico por efectos de la temperatura disminuyendo en 5°C la temperatura de degradación de las cadenas poliméricas. Es importante indicar que la modificación de las temperaturas de eliminación de masa se debe a que el proceso de tratamiento hidrotérmico altera la naturaleza cristalina de las cadenas, originando una estructura de baja cristalinidad que hace al FNTH24 más susceptible la eliminación térmica. El cambio de la cristalinidad es congruente con lo determinado por FTIR, donde se observa un incremento de grupos OH's por la hidrólisis del enlace C-O-C glucosídico, la cual reduce el tamaño de las cadenas, la cristalinidad y resistencia a la temperatura.

4.3.3. TGA/DTG para la fibra tratada a 200°C (FNTT200)

Para la muestra con tratamiento térmico, en el análisis TGA, se obtuvieron resultados similares a la FN. Así se presentaron tres disminuciones de masa, en cantidades no muy diferentes para iguales condiciones de temperatura y atmosfera que las dos pruebas anteriores, como podemos observar en la Figura 25.

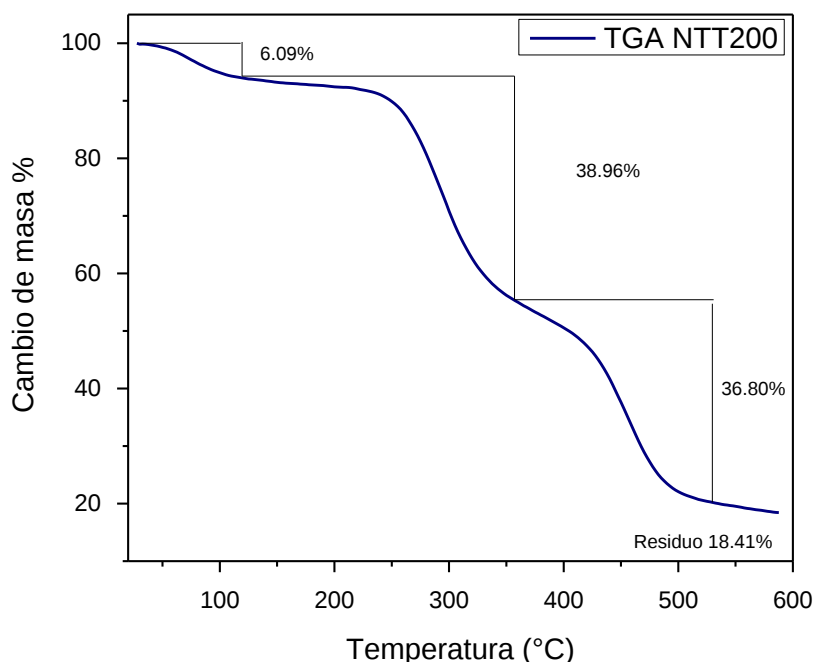


Fig.25: TGA para FNTT200.

En la Figura 26, se muestra la curva de DTGA de FNTT200, donde se observa al igual que en FN tres disminuciones de masa significativas en los siguientes rangos de temperatura de 25-125°C, 200-350°C y 380-540°C. La primera disminución de masa fue de 6.04% menor que en FN debido a que con el tratamiento térmico se eliminó una porción de los compuestos volátiles contenidos en la fibra, así como la temperatura se elevó de 25°C a 125°C debido a la eliminación de agua libre. Este decremento fue máximo a 69°C (4°C menos que FN) lo que indica que el tratamiento térmico favorece la eliminación de agua absorbida.

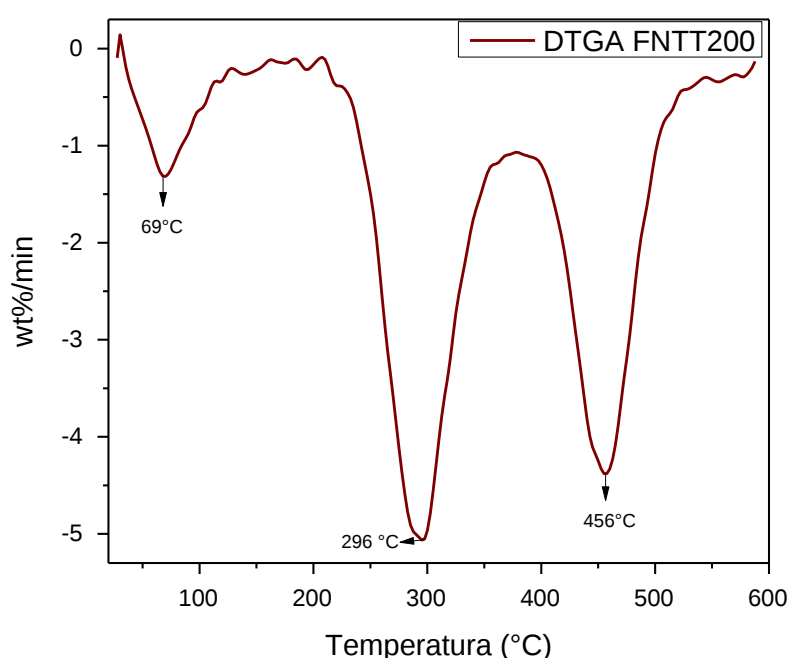


Fig.26: DTGA de FNTT200.

En la etapa II, la FNTT200 se presenta una reducción en masa próxima a los 38.96wt%, así no sufre cambios considerables respecto al wt% de FN (39.17wt%), cuando la temperatura se incrementa de 200°C a 350°C, esto debido a la evaporación de agua higroscópica, así como el agua constitucional. La pérdida de agua en la etapa II, fue máxima a 296°C y fue debida al agua constituyente de las moléculas. En esta misma etapa la disminución de masa entre 200-350°C registra un régimen de degradación térmica, donde unidades monoméricas se separan de las cadenas principales con motivo de la escisión térmica en los enlaces -C-O-C- de la unión glucosídica. Estas son

unidades terminales de la cadena, las cuales presentan un mayor movimiento respecto a las unidades monoméricas interiores.

En la tercera etapa de 380°C a 540°C (mismo que para FN), FNTT200 presentó una disminución de 36.59wt%, el cual es un valor muy cercano a la FN (36.80wt%); esto fue debido a la degradación térmica que presenta las cadenas poliméricas, la cual fue máxima a 456°C.

En Tabla 2 se indica un comparativo de los valores entre FN, FNTH y FNTT. En esta tabla se observa que entre las fibras FN y FNTT200 la temperatura máxima, la reducción en masa %, así como la masa residual no presentan variaciones significativas de hasta los 200°C.

Más allá del comparativo entre FN y FNTT200, la masa residual de FNTH24 fue de 9.28%, lo que representa aproximadamente un 50% menos de masa respecto a FN y FNTT200. Esto indica que el tratamiento hidrotérmico favorece notoriamente la desintegración de la fibra por efecto de aumento de la temperatura y presencia de agua. El grado es tan notorio que se requieren menos de 360 C° para reducir un 50 % en masa de fibra.

Tabla 2 Régimen de degradación térmica y reducción de masa FN, FNTH24 y FNTT200.

Fibra	Valores	Etapas I	Etapas II	Etapas III	MR**
FN	Rango (°C)	60-110	200-350	380-540	17.09
	T. Máxima (°C)*	73	291	460	
	Reducción- masa %	8.93	39.17	33.80	
FNTH24				3a	3b
	Rango (°C)	70-110	230-360	360-420	420-500
	T. Máxima (°C)	70	223	394	455
	Reducción- masa %	8.41	50.46	13.02	18.73
FNTT200	Rango (°C)	25-125	200-350	380-540	18.41
	T. Máxima (°C)	69	296	456	
	Reducción- masa %	6.09	38.96	36.59	

* Temperatura máxima a la cual se pierde la mayor masa en % en la etapa indicada.

** MR: Masa residual.

En la Figura 27 se representan las curvas TGA para FN, FNTH24 y FNTT200 donde se observa de manera clara que las curvas correspondientes a FN y FNT200 se comportan de forma muy parecida siguiendo prácticamente el mismo patrón. Sin embargo, la curva correspondiente a FNTH24 presenta un comportamiento de mayor decremento de masa. Así se ilustra como las pérdidas de masa son mayores debido a que, con el tratamiento hidrotérmico es más fácil la desintegración de las cadenas poliméricas.

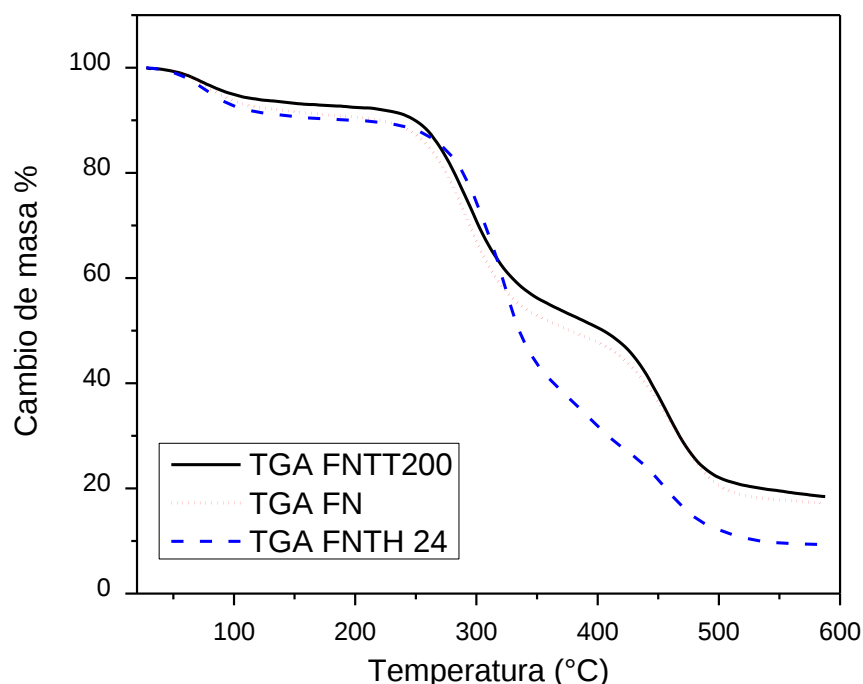


Fig.27: TGA comparativo entre FN, FNTH24 y FNTT200.

De la comparación entre las curvas de la DTGA (Figura 28) se observan las variaciones de T_{max} , siendo la más notoria la FNTH24 en donde el medio termo-acuoso es más efectivo que solo el térmico. El primero favorece más el rompimiento de las uniones C-O-C, Este rompimiento genera un movimiento molecular tal que arregla a las fibras dándoles mayor resistencia a la degradación (etapa II).

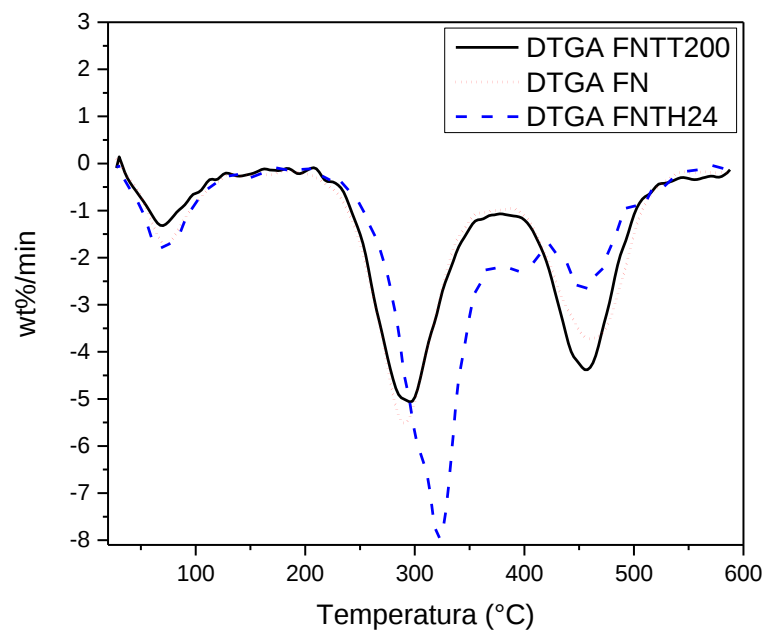


Fig.28: DTGA comparativo para FN, FNTT200 y FNTH24.

4.4 Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC).

4.4.1. DSC de la fibra natural (FN)

En la Figura 29 se observa el comportamiento de la FN debido a los efectos del incremento de la temperatura. El primer efecto próximo a los 100°C origina la salida de humedad, particularmente por la evaporación de agua en la región intermolecular de la fibra (agua unida en especial a la celosa), lo cual da un pico endotérmico.

Cuando se alcanza los 304°C ya existe un evento exotérmico amplio, donde toma lugar la despolimerización de la celulosa en la cual se genera la formación de compuestos volátiles. Esta despolimerización genera residuos produciendo una reacción exotérmica.

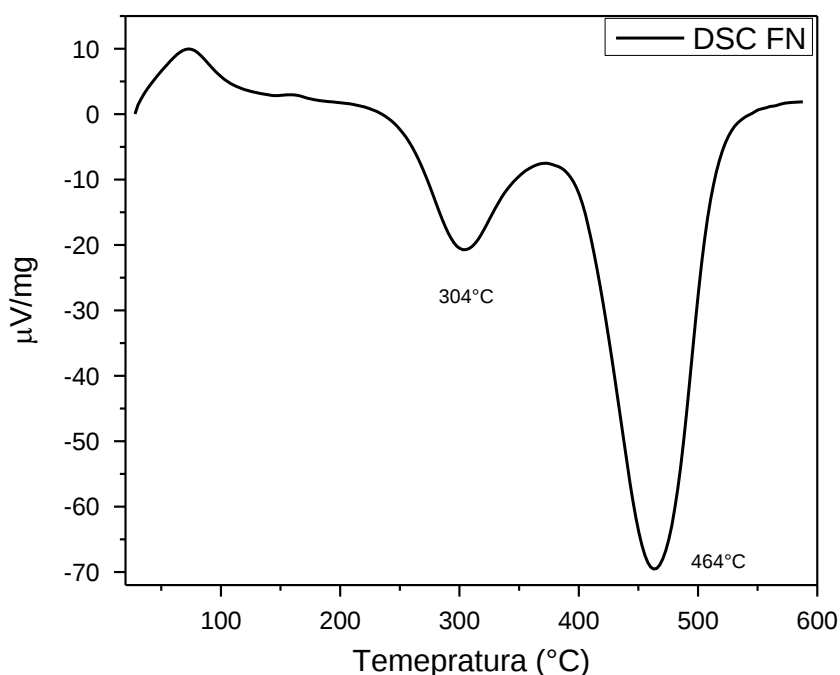


Fig.29: DSC de la FN.

Al pasar por los 464°C se lleva a cabo un nuevo evento exotérmico más amplio que el anterior (a 304 $^{\circ}\text{C}$). En este evento comienza el proceso de degradación de la lignina. Los anillos aromáticos que posee la molécula de lignina en gran número en forma de injertos comienzan a separarse, así, las uniones químicas que existen son eliminadas. La banda de la lignina y su amplitud es un indicativo de la cantidad de este

constituyente en la muestra de la raíz. Por lo cual, con este análisis se puede establecer que la cantidad de lignina es superior a la de la celulosa. Después de los 500°C se genera un gran número de residuos en forma de carbono que se logran advertir en el TGA y DTGA como residuos sólidos siendo estos del 17.09% [29].

4.4.2. DSC de FN con tratamiento hidrotérmico por 24 h. (FNTH24)

La Figura 30 muestra la presencia de un pico endotérmico anterior a los 100°C (entre 50-100°C), seguido de cuatro eventos exotérmicos adicionales en proximidades de 343, 393, 458 y 504 °C. La primera señal endotérmica es próxima a los 100°C; esta se origina por la volatilización del agua, de la región intermolecular de la fibra (comportamiento semejante a la muestra de FN).

Por adelante de los 250°C se observan dos comportamientos exotérmicos, el de 343 y el de 393°C, lo cuales tienen como referencia el evento de la FN a 304°C. La presencia de estos dos eventos térmicos se puede deber a la celulosa y hemicelulosa, ambas están constituidas de áreas cristalinas y amorfas. La hemicelulosa tiene una gran cantidad de injertos que poseen una gran cantidad de grupos OH's que se unen a las moléculas de agua, que provienen del tratamiento hidrotérmico. Es por esto, que se observa la presencia de dos eventos: el de 343°C, que se debe a la celulosa y ramificaciones de la hemicelulosa, y el evento a 393°C, que se puede deber a la actividad de la cadena principal de la hemicelulosa, la cual existe en un arreglo mucho más estables y definido en comparación a sus injertos. Esta descomposición de los arreglos puede servir para cuantificar la cantidad de hemicelulosa en la muestra.

A 458°C se lleva un nuevo evento exotérmico que ya se había presentado en la FN, que es el proceso de degradación de la lignina. Donde los anillos aromáticos comienzan a separarse entre ellos.

Al llegar a los 504°C se presenta un último evento, de menor amplitud con motivo de la desintegración de la estructura aromática de la lignina. La capacidad de separación del medio acuoso logra aislar las estructuras aromáticas haciéndolas más vulnerables a la temperatura y con ello una menor masa residual como se advierte por DTGA (9.28 %).

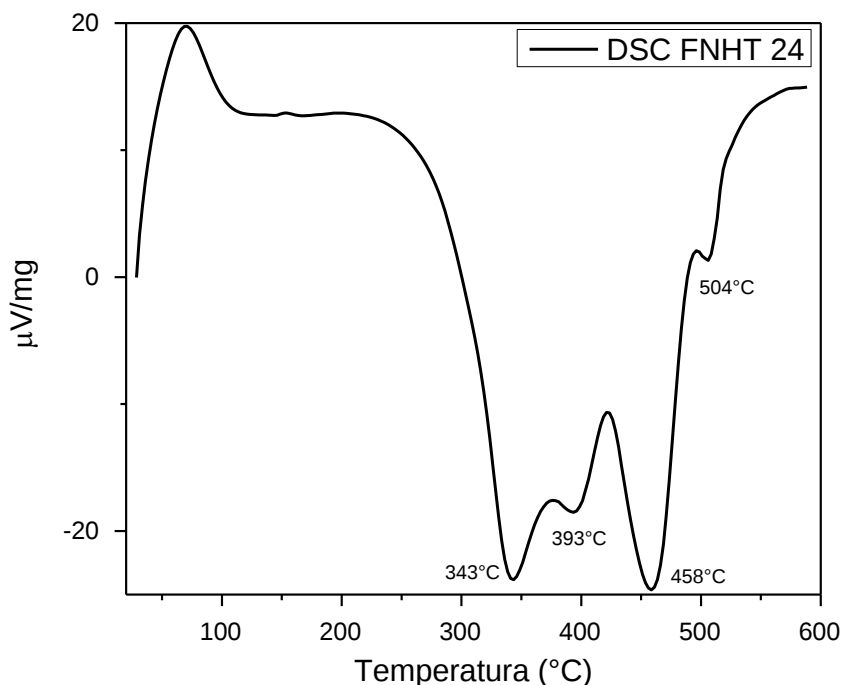


Fig.30: DSC de FNTH24

4.4.3. DSC de FN con tratamiento térmico a 200°C (FNTH200)

La Figura 31 muestra el termograma de la muestra FNTH200°C, en esta se puede observar una conducta térmica al igual que la que presento la FN. En esta muestra se observan los eventos a 70, 307 y 457°C, correspondientes a la pérdida de humedad y al comienzo y degradación total de los compuestos presentes en la celulosa, hemicelulosa y lignina.

El proceso térmico no generó un tratamiento separado de los constituyentes de la fibra del lirio, por lo cual, por DTGA se observa que existe un valor de material en masa residual de 18.41% que es próximo al reportado por la FN de 17.09%.

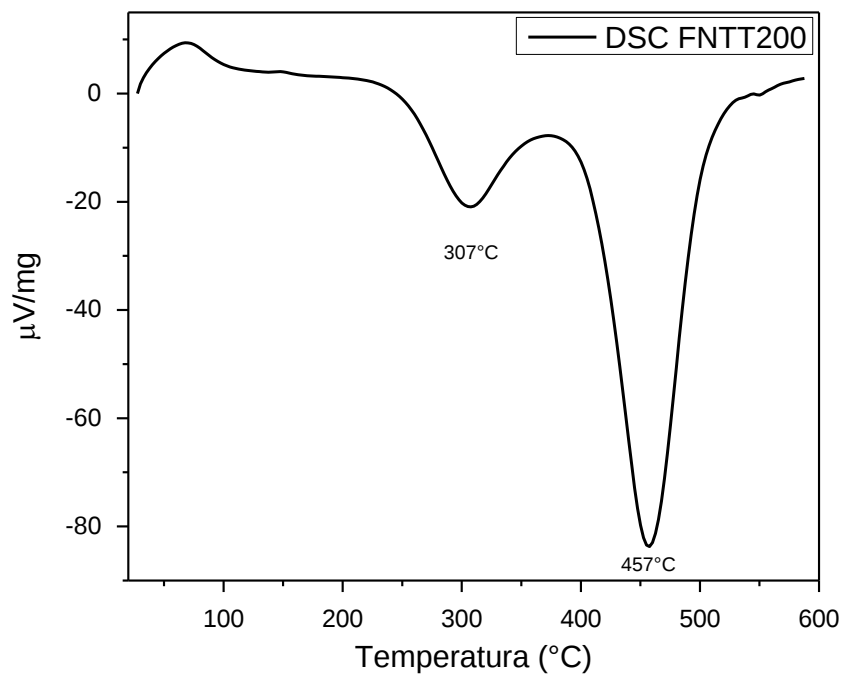


Fig.31: DSC de FNT200.

La Tabla 3, exhibe un comparativo de los eventos exotérmicos y endotérmicos presentes en las fibras de FN, FNTH y FNTT. Como agregado inferior a la tabla se detallan los comportamientos de la celulosa, hemicelulosa y lignina reportada en estudios previos.

Tabla 3: Régimen térmica y reducción de masa FN, FNTH24 y FNTT200.

Fibra	Exo ($^{\circ}\text{C}$)		Señales exotérmicas ($^{\circ}\text{C}$)		
FN	74		304		
			464		
FNTH24	86	343	393	458	504
FNTT200	90		307		
			457		
Celulosa* [29, 30]	116		350		
Celulosa* [29, 30]			350	447	494
Hemicelulosa*[29, 30]	125	250			
Lignina* [29, 30]	100	250	250-420		

* Datos de fuentes bibliográficas.

4.5 Pruebas de Resistencia Eléctrica

4.5.1 Mediciones de la resistencia Eléctrica

En la Tabla 4 se indican los resultados obtenidos en las mediciones de resistencia eléctrica para cada una de las muestras de FN, FNTH y FNTH, en este análisis se varió la potencia suministrada a las pastillas de fibra desde 250V hasta 1000V.

Tabla 4: Mediciones de resistencia eléctrica para cada muestra

Muestra	Voltaje suministrado (V)		
	250	500	1000
	Resistencia en M Ω		
FN	311	280	252
FNTH2	1000	2000	4000
FNTH4	1000	2000	4000
FNTH8	1000	2000	4000
FNTH24	1000	2000	4000
FN	550	530	510
FNTH50	1000	1180	1100
FNTH100	1000	1240	1440
FNTH150	1000	2000	2530
FNTH200	1000	2000	4000

4.5.2 Cálculo de Resistividad

Con los datos obtenidos de resistencia eléctrica se calculó la resistividad eléctrica usando la ecuación 1. Los resultados se indican en la Tabla 5.

Tabla 5: Calculo de resistividad presentada por las muestras FN, FNTH y FNTH

Muestra	Voltaje suministrado (V)		
	250	500	1000
	Resistividad en M Ω *m		
FN	10.3199	9.2913	8.3622
FNTH2	44.2442	88.4884	176.9768
FNTH4	66.3663	132.7326	265.4652
FNTH8	66.3663	132.7326	265.4652
FNTH24	66.3663	132.7326	265.4652
FNTH50	11.0611	13.0520	12.1676
FNTH100	11.0611	13.7157	15.9279
FNTH150	12.0666	24.1332	30.5285
FNTH200	22.1221	44.2442	88.4884

La Figura 32 muestra la variación de la resistividad en función de la temperatura y el voltaje suministrado para cada una de las muestras sometidas a un tratamiento hidrotérmico en equipo Soxhlet, se puede observar que con el aumento del tiempo de tratamiento hidrotérmico la resistividad también aumenta, siguiendo el mismo comportamiento en cada una de las tres variaciones de voltaje. Eso debido a que con el tiempo de tratamiento hidrotérmico, las cadenas poliméricas pierden una pequeña cantidad de grupos OH que se liberan como moléculas de agua; esto genera que las fuerzas con las que se encuentran unidas se debiliten originando la separación entre ellas, de esta forma se forman espacios libres entre las cadenas poliméricas. Estos espacios al contener aire impiden el paso de electrones por lo que en comparación con FNTT las FNTH presentan una resistividad más elevada.

El aumento de la resistividad de las FNTH se analizó por separado para cada una de los voltajes tomando como base la resistividad de la FN. De esta forma se puede observar que para 250 V la resistividad aumenta de $10.31 \text{ M}\Omega\cdot\text{m}$ a $66.36 \text{ M}\Omega\cdot\text{m}$ lo que representa que con el aumento en las horas de tratamiento hidrotérmico (FNTH). La fibra presenta una resistividad 6 veces más grande que la FN. Cuando la potencia suministrada es de 500 V la resistividad va de $9.29 \text{ M}\Omega\cdot\text{m}$ a $132.73 \text{ M}\Omega\cdot\text{m}$ en este caso el aumento en la resistividad es de aproximadamente 10 veces mayor que en FN. Para el tercer y último caso, en el cual se suministraron 1000 V la resistividad aumento de $8.36 \text{ M}\Omega\cdot\text{m}$ hasta $265.46 \text{ M}\Omega\cdot\text{m}$, aquí se presenta el mayor aumento de la resistividad de las tres variaciones de voltaje siendo de aproximadamente 30 veces más grande que para FN.

Los aumentos en la resistividad ocurrieron durante las primeras 4 horas de tratamiento hidrotérmico a partir de ese tiempo ya no varían lo cual indica que con un tratamiento hidrotérmico de 4 horas la resistividad de la fibra se ve mejorada de manera muy satisfactoria.

También se puede atribuir este aumento de la resistividad a que con el tiempo de tratamiento hidrotérmico se pudieran ir perdiendo algunos minerales o metales que están absorbidos en la muestra desde que esta fue recolectada en el lago y que no

fueron retirados con los tratamientos hidrotérmicos a temperatura ambiente y agua destilada.

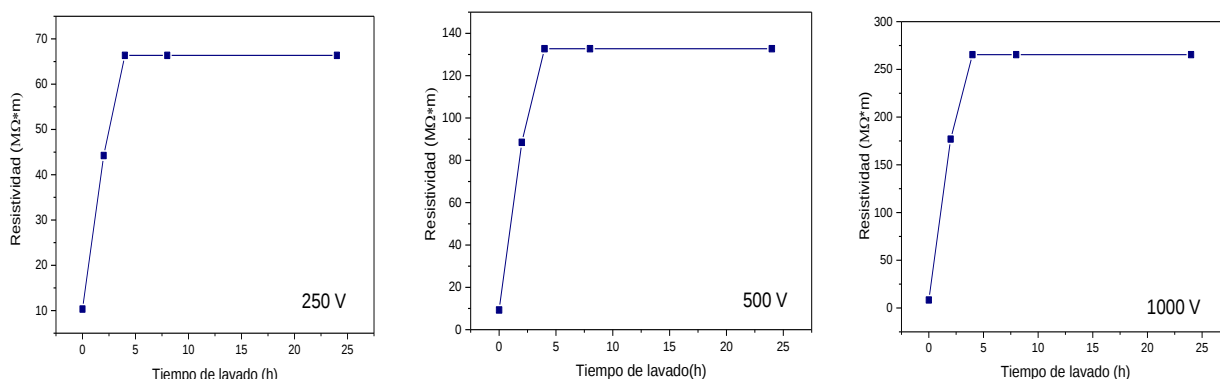


Fig.32 Grafico resistividad (MΩ) vs de tiempo de tratamiento hidrotérmico (horas) para tres voltajes suministrado a las FNTH.

En Figura 33 se observa la variación de la resistividad en función de la temperatura para cada una de las muestras FNTH, se puede observar que con el aumento de la temperatura la resistividad también aumenta, siguiendo el mismo patrón para cada variación de voltaje. Este aumento en la resistividad es debido a que al aumentar la temperatura el agua absorbida contenida en la muestra se libera por lo tanto la resistividad tiene a aumentar, no de forma tan marcada como en el caso de FNTH puesto que en este caso no se genera una expansión ni separación de las cadenas poliméricas.

Analizando por separado el aumento de la resistividad de FNTH para cada potencia suministrada se observa que para 250 V existe un aumento que va de 10.31 MΩ·m a 22.12 lo que representa 2 veces más que FN. Para el caso de 500 V la resistividad aumenta de 9.29 MΩ·m a 44.24 MΩ·m en comparación con FN presenta una resistencia 4 veces mayor. Finalmente, cuando el voltaje suministrado es de 1000 V la resistividad aumenta de 8.36 a 88.48 lo que representa una resistividad de aproximadamente 10 veces más que FN.

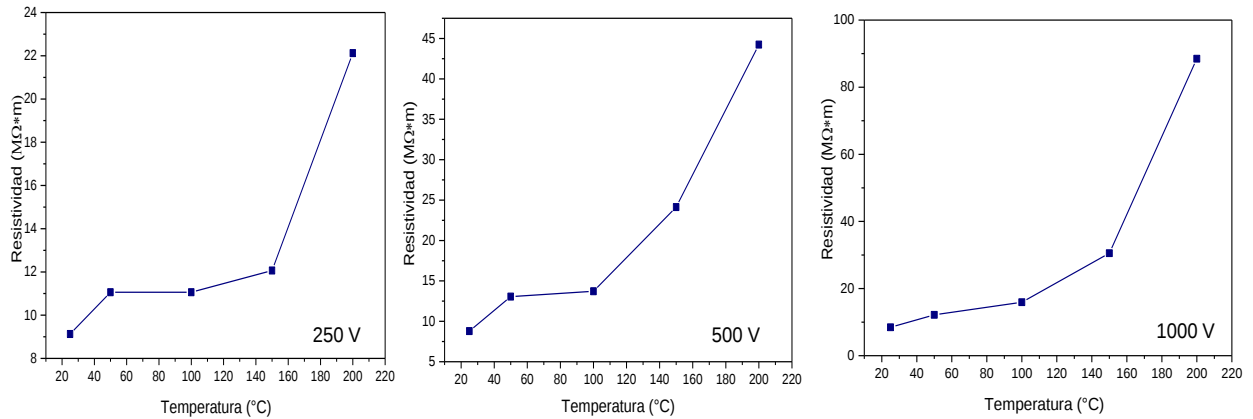


Fig.33: Grafico resistividad ($M\Omega$) vs temperatura de tratamiento térmico ($^{\circ}C$) para tres voltajes suministrado a las FNTT.

Todo tipo de materiales se divide en tres grandes grupos respecto a la capacidad que presentan estos a la oposición del flujo de electrones sobre ellos de esta forma encontramos materiales conductores, semiconductores y aislantes, para el caso de las fibras de raíz de lirio acuático basados en los resultados anteriores se observa que están dentro del grupo de los aislantes.

5. Conclusiones

Se obtuvieron tres fibras provenientes del lirio acuático para su análisis, Estas fibras fueron la fibra natural (FN), fibra natural con tratamientos hidrotérmicos (FNTH) y fibras naturales con tratamientos térmicos (FNTT).

Por FTIR se establece que la fibra FN está compuesta principalmente por celulosa, hemicelulosa y lignina, sus grupos funcionales así lo establecen. Los grupos funcionales indican que no existe mayor degradación química estructural hasta los 200°C, particularmente, solo existe la eliminación de agua absorbida, cuando las fibras son sometidas a tratamientos térmicos e hidrotérmicos.

Solo existe una mayor reducción de los enlaces glucosídicos en el proceso hidrotérmico. Este proceso también conduce a una mayor vulnerabilidad de la fibra en un proceso posterior descomposición térmica, como lo indica el TGA y DSC. La fibra FNTH se descompone más rípidamente por acción de la temperatura después de los 200°C que una fibra FN y FNTT.

El DSC indica que existe una mayor disgregación de la FNTH, lo que hace posible establecer la presencia de sus compuestos, donde la hemicelulosa tiene una muy alta concentración. Por otro lado, la FN y la FNTT mantienen un comportamiento térmico muy similar.

La expansión interna de la fibra llevada a cabo por el tratamiento hidrotérmico promueve en ella un incremento de la resistividad, este incremento respecto a la FN es del orden del 6, 10 y 30 veces mayor cuando se valora a 250, 500 y 100V respectivamente. Los valores se mantuvieron constantes después de 4 horas. Este acto notorio del proceso de tratamiento hidrotérmico prevé la posibilidad de acceder a una fibra del lirio acuático con características de resistencia eléctrica ajustada en base tiempo de tratamiento.

Recomendaciones

Es importante mencionar que en el presente trabajo no se realizaron pruebas de absorción de metales, sin embargo se considera que con el aumento de la disgregación de las cadenas poliméricas y la remoción de los extractivos acuosos por efecto del tratamiento hidrotérmico, se genera un incremento de área superficial lo cual podría favorecer a un aumento de la capacidad de absorción de metales pesados.

Bibliografía

1. José A. Hernández, Alejandro Torres-García, Flor B. Conejo-Moreno, Alexia S. Oliva-González, Alba N. Ardila A., *Aprovechamiento de Eichhornia crassipes (lirio acuático) proveniente de la zona de Yuriria, Guanajuato, como fuente de Lignina, Celulosa y Hemicelulosa*. 2015.
2. Sluiter, A., et al., *Determination of structural carbohydrates and lignin in biomass*. Laboratory analytical procedure, 2008. **1617**: p. 1-16.
3. Carrión, C., et al., *Aprovechamiento potencial del lirio acuático (Eichhornia crassipes) en Xochimilco para fitorremediación de metales*. Agrociencia, 2012. **46**(6): p. 609-620.
4. Guadiana, J. and H. Chapa Saldaña, *El lirio acuático en México problemas y soluciones*. El campo (Mexico).(Mar, 1978. **53**(1033): p. 3-24.
5. Gutiérrez López, E.D., et al., *Control de malezas acuáticas en México*. 1994.
6. Meléndez, A.G.R., et al., *Aprovechamiento energético integral de la Eichhornia crassipes (Buchón de agua)-Integral Energetic use of Echornia Crassipes*. Ingenium Revista de la facultad de ingeniería, 2017. **18**(35): p. 134-152.
7. Terán Guerrero, J.E. and P.D. Solórzano Solís, *Obtención de bioetanol del Jacinto de agua (eichhornia crassipe) proveniente del embalse Sixto Durán Ballén mediante proceso enzimático*. 2013, Calceta: Espam.
8. López, R.A.N., et al., *Fitorremediación: fundamentos y aplicaciones*.
9. Moleón, M.d.C.J., et al., *fitorremediación de metales pesados*.
10. Suárez, i.j.g., *“capacitación a un grupo de pescadores ribereños para la elaboración de artesanía de lirio acuático como una alternativa de manejo en el humedal de alvarado veracruz”*.
11. Nicolás, J.L.G., *Cambios en la composición del lirio acuático (Eichhornia crassipes) debidos a su grado de madurez ya su transformación biotecnológica*.
12. Manuel, D.P.J., *El lirio acuático (eichhornia grassipe) como recurso forrajero*. 1996.
13. Atehortua, E. and C. Gartner, *Estudios preliminares de la biomasa seca de eichhornia crassipes como adsorbente de plomo y cromo en aguas*. Revista colombiana de materiales, 2013(4): p. 81-92.
14. Morrison-boyd, *Química Orgánica*, ed. A.-W. Iberoamericana. 1990, USA.
15. Seymour, R.B. and C.E. Carraher, *Introducción a la química de los polímeros*. 1995: Reverté.
16. Billmeyer, F.W., *Ciencia de los polímeros*. 1975: Reverté.
17. Morrison robert t., b.r.n., *Química Orgánica*. 5 ed, ed. p. educación. 1998, Mexico.
18. Zapata, D., R. Pujol, and F. Coda, *Polímeros biodegradables: una alternativa de futuro a la sostenibilidad de medio ambiente*. Técnica Industrial, 2012. **297**: p. 76-80.
19. Carey, F.A. and R.M. Giuliano, *Química orgánica (9a*. 2014: McGraw Hill Mexico.
20. Pu, Y., D. Zhang, P.M. Singh & A. J. Ragauskas, *The new forestry biofuels sector*. Biofuels, bioproducts and biorefining, 2008.
21. Bayer, H.W.W., *Manual de Química Orgánica*. 1987.

22. Medina-Morales, M.A., L. Lara-Fernández, and C.N. Aguilar, *Aprovechamiento de materiales lignocelulósicos para la producción de etanol como carburante*. Revista Científica, 2011. **3**(6).
23. Chávez-Sifontes, M. and M.E. Domine, *Lignina, estructura y aplicaciones: métodos de despolimerización para la obtención de derivados aromáticos de interés industrial*. Avances en ciencias e Ingeniería, 2013. **4**(4).
24. Rojas, M.M., *Síntesis y caracterización de un biopolímero a base de quitosano y gomas de origen natural.*, in *Facultad de Ingeniería Química*. 2006, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.: Morelia, Michoacan, Mexico.
25. Nuñez, U.C., *Análisis morfológico y estructural de la fibra ceiba aesculifolia* in *Facultad de Ingeniería Química* 2018, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.: Morelia, Michoacan, Mexico
26. Ohring, M., *Engineering materials science*. 1995: Elsevier.
27. Albella, J.M. and J.M. Martínez-Duart, *Fundamentos de electrónica física y microelectrónica*. 1996: Addison-Wesley Iberoamericana.
28. Abidi, N., L. Cabrales, and C.H. Haigler, *Changes in the cell wall and cellulose content of developing cotton fibers investigated by FTIR spectroscopy*. Carbohydrate Polymers, 2014. **100**: p. 9-16.
29. Yang, H., et al., *Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis*. Fuel, 2007. **86**(12-13): p. 1781-1788.
30. Kabir, M., et al., *Effects of chemical treatments on hemp fibre structure*. Applied Surface Science, 2013. **276**: p. 13-23.