



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Química

**PROPUESTA Y DISEÑO DE UN MÉTODO, A NIVEL DE LABORATORIO,
PARA OBTENER UN PRESERVANTE NATURAL PARA EL CULMO DEL
BAMBÚ (*Guadua angustifolia*) A PARTIR DE LOS EXTRACTOS
CELULÓSICOS DEL MISMO MEDIANTE SÍNTESIS DE CANNIZZARO**

Fernando Antonio Ramírez Chaclán

Asesorado por: Inga. Qca. Telma Maricela Cano Morales

Guatemala, abril de 2007

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**PROPUESTA Y DISEÑO DE UN MÉTODO, A NIVEL DE LABORATORIO,
PARA OBTENER UN PRESERVANTE NATURAL PARA EL CULMO DEL
BAMBÚ (*Guadua angustifolia*) A PARTIR DE LOS EXTRACTOS
CELULÓSICOS DEL MISMO MEDIANTE SÍNTESIS DE CANNIZZARO.**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

FERNANDO ANTONIO RAMÍREZ CHACLÁN

ASESORADO POR: INGA. QCA. TELMA MARICELA CANO MORALES
AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE
INGENIERO QUÍMICO

GUATEMALA, ABRIL DE 2007

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE LA JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Inga. Glenda Patricia García Soria
VOCAL II	Inga. Alba Maritza Guerrero de López
VOCAL III	Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón
VOCAL IV	Br. Kenneth Issur Estrada Ruiz
VOCAL V	Br. Elisa Yazminda Vides Leiva
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivonne Véliz Vides

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. José Manuel Tay Oroxóm
EXAMINADOR	Ing. José Eduardo Calderón García
EXAMINADORA	Inga. Casta Petrona Zeceña Zeceña
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivonne Véliz Vides

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**PROPUESTA Y DISEÑO DE UN MÉTODO, A NIVEL DE LABORATORIO,
PARA OBTENER UN PRESERVANTE NATURAL PARA EL CULMO DEL
BAMBÚ (*Guadua angustifolia*) A PARTIR DE LOS EXTRACTOS
CELULÓSICOS DEL MISMO MEDIANTE SÍNTESIS DE CANNIZZARO,**

tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 31 de agosto de 2006.

Fernando Antonio Ramírez Chaclán



CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



Guatemala 30 de enero de 2007

Ingeniero
Williams Álvarez
Director de Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

Estimado Ingeniero:

El motivo de la presente es para darle a conocer que he revisado el informe final del trabajo de graduación del estudiante: **Fernando Antonio Ramírez Chaclán** con carné número **2000-19872** titulado **“PROPUESTA Y DISEÑO DE UN METODO, A NIVEL DE LABORATORIO, PARA OBTENER UN PRESERVANTE NATURAL PARA EL CULMO DEL BAMBU (*Guadua angustifolia*) A PARTIR DE LOS EXTRACTOS CELULOSICOS DEL MISMO MEDIANTE SINTESIS DE CANNIZZARO.”**

Habiendo encontrado el informe final de trabajo de graduación satisfactorio, lo remito a su consideración para proceder a la respectiva revisión.

Atentamente,



Inga. Qca. Telma Maricela Cano Morales
Colegiado 433
Asesora del trabajo de graduación
Supervisora del Laboratorio de Química Industrial/CII



Guatemala, 16 de marzo de 2,007.

FACULTAD DE INGENIERIA

Ingeniero
Williams Guillermo Álvarez Mejía
Director Escuela Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería
Presente.

Estimado Ingeniero Álvarez.

Atentamente me dirijo a usted para informarle que, he revisado el Informe Final del trabajo de graduación del estudiante **Fernando Antonio Ramírez Chaclán**, con número de carné 2000-10872 titulado: "PROPUESTA Y DISEÑO DE UN MÉTODO, A NIVEL DE LABORATORIO, PARA OBTENER UN PRESERVANTE NATURAL PARA EL CULMO DEL BAMBÚ (*Guadua angustifolia*) A PARTIR DE LOS EXTRACTOS CELULÓSICOS DEL MISMO MEDIANTE SÍNTESIS DE CANNIZZARO." .

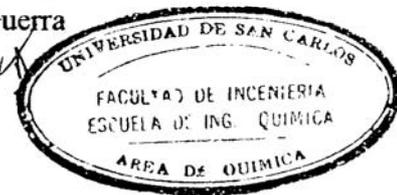
Habiendo encontrado el informe final totalmente satisfactorio, lo remito a su consideración para proceder a la revisión final y aprobación.

Sin otro particular me suscribo de usted.

Atentamente,

Y ENSEÑANZA A TODOS

Ing. César Alfonso García Guerra
REVISOR



c.c archivo



FACULTAD DE INGENIERIA

El Director de la Escuela de Ingeniería Química Ing. Williams Guillermo Álvarez Mejía Después de conocer el dictamen del Asesor con el Visto Bueno del Jefe del Departamento al trabajo de Graduación de la estudiante Fernando Antonio Ramírez Chaclán titulado: “**PROPUESTA Y DISEÑO DE UN MÉTODO, A NIVEL DE LABORATORIO, PARA OBTENER UN PRESERVANTE NATURAL PARA EL CULMO DEL BAMBÚ (*Guadua angustifolia*) A PARTIR DE LOS EXTRACTOS CELULÓSICOS DEL MISMO MEDIANTE SÍNTESIS DE CANNIZZARO**” procede a la autorización del mismo.


Ing. Williams Guillermo Álvarez Mejía
DIRECTOR
ESCUELA INGENIERÍA QUÍMICA



Guatemala, abril 2, 007

ACTO QUE DEDICO A:

MI DIOS	A Él sea la honra y la gloria
MI MADRE	Gloria Chaclán, porque este es el fruto de todo el sacrificio que ella hizo por mí durante tantos años, este triunfo es tuyo mamá.
MI PADRE	Antonio Ramírez, por que me apoyo en todo momento.
MIS HERMANAS	Flor de María y Paula, gracias por todo.
MI ABUELITA	Antonia Chaclán, por su cariño.
MIS FAMILIARES	En especial a mi tía Susy, por su apoyo y ayuda.

1.4	Debilidades y protección	9
1.4.1	Insectos y plagas	9
1.4.2	Deterioro biológico	10
1.4.3	Protección contra incendios	10
2.	CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DEL BAMBÚ	
	(<i>Guadua angustifolia</i>)	11
2.1	Composición química orgánica	11
2.1.1	Componentes activos del bambú	11
2.1.1.1	Celulosa	11
2.1.2.1	Oligosacáridos	12
3.	PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS	
	DE LOS CARBOHIDRATOS	13
3.1	D-Glucosa: Mutarrotación	13
3.2	Reacciones de los carbohidratos	15
3.2.1	Derivados químicos de la celulosa	15
3.2.2	Desproporcionamiento. Reacción de Cannizzaro	16
3.2.3	Reacción con ácido nítrico	17
3.2.4	Pruebas de identificación. Reactivos de Benedict y de Fehling	17
4.	PROPUESTA DE LA REACCIÓN GENERAL PARA LA SÍNTESIS DEL ÁCIDO D-GLUCÁRICO A PARTIR DE LA CELULOSA PROVENIENTE DEL CULMO DEL BAMBÚ	19
4.1	Planteamiento de la reacción general	19
4.2	Planteamiento del mecanismo de reacción empírico	22

5. METODOLOGÍA	27
5.1 Ubicación	27
5.2 Recurso Humano	27
5.3 Recursos materiales	27
5.4 Equipo y cristalería	28
5.5 Propuesta del procedimiento	28
5.5.1 Procedimiento para las pruebas de identificación	29
5.6 Diseño experimental	30
5.6.1 Variable respuesta	30
5.7 Análisis estadístico	30
6. RESULTADOS	33
7. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	47
CONCLUSIONES	53
RECOMENDACIONES	55
BIBLIOGRAFÍA	57
ANEXOS	59

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1	Plantación de bambú, Santa Bárbara Suchitepéquez	2
2	Culmo y entrenudos del bambú, plantación de bambú, Santa Bárbara Suchitepéquez	3
3	Parénquima de bambú sin preservar, coloración natural, diferentes aumentos	6
4	Algunas características botánicas básicas del bambú	7
5	Estructura de la celulosa	12
6	Estructura de la sacarosa	12
7	Equilibrio entre cetales/acetales y hemicetales/hemiacetales	14
8	Mutarrotación de la D-Glucosa	14
9	Conversión de la celulosa a xantato de celulosa en medio alcalino	15
10	Intermediario tetraédrico en la reacción de Cannizzaro	16

11	Oxidación de la D-Glucosa por tratamiento con ácido nítrico	17
12	Relación estequiométrica teórica del equilibrio de la reacción redox del ácido D-Glucárico	35
13	Cantidades esperadas de las especies participantes en la cinética de la reacción del ácido D-Glucárico, muestra A	36
14	Cantidades esperadas de las especies participantes en la cinética de la reacción del ácido D-Glucárico, muestra B	37
15	Cantidades esperadas de las especies participantes en la cinética de la reacción del ácido D-Glucárico, muestra C	38
16	Cantidades obtenidas experimentalmente de las especies participantes en la cinética de reacción del ácido D-Glucárico, muestra A	41
17	Cantidades obtenidas experimentalmente de las especies participantes en la cinética de reacción del ácido D-Glucárico, muestra B	42
18	Cantidades obtenidas experimentalmente de las especies participantes en la cinética de reacción del ácido D-Glucárico, muestra C	43

19	Cinética de la reacción del ácido D-Glucárico	44
20	Primera derivada del ajuste de polinomio para la conversión de la sal sódica del ácido D-Glucárico	45
21	Equipo de reflujo para extracción y reducción de celulosa	74
22	Equipo de filtración al vacío	75
23	Muestra de bambú (<i>Guadua angustifolia</i>) pulverizada	75
24	Muestra de bambú en hidróxido de sodio antes del tratamiento	76
25	Equipo para extracción de celulosa. (Método de Kraft)	76
26	Extractos obtenidos después del tratamiento por el método Kraft	77
27	Filtración al vacío de los extractos de la madera	77
28	Filtración al vacío de los extractos de la madera	78
29	Equipo de filtración al vacío	78
30	Material sólido obtenido de la filtración	79
31	Ataque con ácido nítrico	79
32	Comparación de las soluciones previa al ataque con ácido nítrico y después del ataque con ácido nítrico	80
33	Pruebas de identificación realizadas a la muestra A	80

34	Pruebas de identificación realizadas a la muestra B	81
35	Pruebas de identificación realizadas a la muestra C	81
36	Etapa de filtración para obtener los precipitados	82
37	Precipitados de óxido cuproso e hidróxido de cobre obtenidos	82

TABLAS

I	Caracterización química del culmo género <i>Guadua</i>	11
II	Arreglo matricial de los datos obtenidos de la proporción celulosa-ácido carboxílico para n muestras y n+2 corridas	31
III	Relación estequiométrica teórica del equilibrio de la reacción redox del ácido D-Glucárico	33
IV	Cantidades esperadas de las especies participantes en la cinética de la reacción del ácido D-Glucárico, muestra A	33
V	Cantidades esperadas de las especies participantes en la cinética de la reacción del ácido D-Glucárico, muestra B	34
VI	Cantidades esperadas de las especies participantes en la cinética de la reacción del ácido D-Glucárico, muestra C	34
VII	Cantidades obtenidas experimentalmente de las especies participantes en la cinética de reacción del ácido D-Glucárico, muestra A	39
VIII	Cantidades obtenidas experimentalmente de las especies participantes en la cinética de reacción del ácido D-Glucárico, muestra B	39

IX	Cantidades obtenidas experimentalmente de las especies participantes en la cinética de reacción del ácido D-Glucárico, muestra C	40
X	Proporción de los componentes activos en la muestra	59
XI	Pesos de papel filtro y papel filtro y muestras, temperatura y pH de las soluciones	66
XII	Densidades de las soluciones utilizadas en el experimento	67
XIII	Cantidades de las especies involucradas en la reacción	68
XIV	Relación estequiométrica teórica del equilibrio de la reacción redox del ácido D-Glucárico	69
XV	Cantidades esperadas de las especies participantes en la cinética de la reacción del ácido D-Glucárico, muestra A	69
XVI	Cantidades esperadas de las especies participantes en la cinética de la reacción del ácido D-Glucárico, muestra B	70
XVII	Cantidades esperadas de las especies participantes en la cinética de la reacción del ácido D-Glucárico, muestra C	70
XVIII	Cantidades obtenidas experimentalmente de las especies participantes en la cinética de reacción del ácido D-Glucárico, muestra A	71
XIX	Cantidades obtenidas experimentalmente de las especies participantes en la cinética de reacción del ácido D-Glucárico, muestra B	71

XX	Cantidades obtenidas experimentalmente de las especies participantes en la cinética de reacción del ácido D-Glucárico, muestra C	72
XXI	Linealización del polinomio para obtener la ecuación de la velocidad	72
XXII	Datos del análisis estadístico del experimento	73
XXIII	Valores de la t de student para el experimento	73

LISTA DE SÍMBOLOS

α	Orden global de la ley de velocidad de la reacción
$^{\circ}\text{C}$	Grados Celsius
cm	Centímetros
cm³	centímetros cúbicos
Cn	Posición que ocupa el carbono en la estructura del carbohidrato
CV	Coeficiente de variación
$\frac{d(n)}{dt}$	Primera derivada con respecto al tiempo
e^{-}	electrón
E₂	Reacción de eliminación bimolecular
$^{\circ}\text{F}$	Grado Fahrenheit
g	Gramos
H⁺	Hidrónio
k_A	Constante de velocidad en la cinética de reacción

lb	Libras
m	metro
μ	Valor conocido
n	número de datos en la muestra
n_A	moles de la especie A
OH^-	Hidroxilo
P.M.	Peso molecular
S	Desviación estándar
t	t de Student
t	tiempo
T	Temperatura
R1	Grupo alquilo
r_A	Velocidad de apareamiento de la especie A
Y_i	Total de corridas realizadas en el experimento bajo la i-esima muestra
\bar{y}_i	Media de las corridas en cada muestra
X	Media de los datos
/	Grados de libertad

<	Menor que
>	Mayor que
%	Porcentaje
1:1	Proporción estequiométrica
2:2	Proporción estequiométrica

GLOSARIO

Ápice	Extremo superior del tallo del bambú
Culmo	Tallo del bambú
Coefficiente de	
Variación	Desviación estándar relativa de una población
Esteras	Tejidos de esparto o juncos
Glucósido	Compuesto de la glucosa
Grado de	
Conversión	Se refiere a los moles de la especie que reaccionaron en función de los moles de la especie que se alimentaron
Guadua	
Angustifolia	Especie de bambú que pertenece al género de las herbáceas.
Gramínea	Familia de monocotiledóneas de tallos huecos divididos por nudos y flores con espigas o panojas.
Imbricada	Escamas sobrepuestas que posee el bambú
Lodícula	Escamas dispuestas en la base del ovario

Monómero	La unidad más pequeña que compone un polímero
Paquimorfico	Especie de tallo que crece hacia fuera
Parénquima	Tejido celular esponjoso
Pistilo	Órgano femenino de la flor
Relación	
Estequiométrica	Correspondencia cuantitativa entre los reactivos y productos en una reacción química
Septum	Membrana rígida que separa al interior del bambú en módulos estancos
Tensil	Referente a tensión

RESUMEN

Se planteó y diseñó un método, a nivel de laboratorio, para sintetizar un ácido carboxílico a partir de la celulosa proveniente del culmo del bambú *-Guadua angustifolia-*, utilizando para ésta reacción las propiedades físicas y químicas que presentan los hidratos de carbono, además de utilizar el método de Kraft para la hidrólisis de la celulosa y la reacción de Cannizzaro, para sintetizar el ácido correspondiente, todo esto con el fin de obtener un método factible para sintetizar un preservante natural para el cuidado del bambú contra el ataque de las plagas.

Para el diseño del método se estudiaron en primer lugar las propiedades químicas de los carbohidratos presentes en el bambú, específicamente, en la especie *Guadua angustifolia*, después se planteó la reacción general de la síntesis de la sal sódica del ácido D-Glucárico, a partir de la celulosa y se planteó el mecanismo de reacción para dicha síntesis, con esto se obtuvo las cantidades estequiométricas necesarias que se utilizaron en el experimento.

En el planteamiento del experimento, se utilizó el método de Kraft para extraer la celulosa presente en el bambú, además se hidrolizó la celulosa para convertirla en glucosa, la cual fue tratada con ácido nítrico para producir la sal sódica del ácido D-Glucárico, el cual se identificó mediante la reacción con el reactivo de Fehling. Se determinó que con el método propuesto puede obtenerse la sal sódica del ácido D-Glucárico, pero el rendimiento de la reacción es muy bajo, haciendo así el método poco eficiente.

Se trabajó a una temperatura de 23°C y una presión de 0.84 atms.

HIPÓTESIS

Alternativa

Si es posible obtener un rendimiento significativo a partir del culmo del bambú por hidrólisis alcalina de la celulosa a azúcares ácido -aldáricos-, utilizando para este procedimiento la síntesis de Cannizzaro.

Nula

No es posible obtener un rendimiento significativo a partir del culmo del bambú por hidrólisis alcalina de la celulosa a azúcares ácidos –aldáricos-, utilizando para este procedimiento la síntesis de Cannizzaro.

OBJETIVOS

General

Proponer y diseñar un método, a nivel de laboratorio, para obtener un preservante natural para el culmo del bambú -*Guadua angustifolia*- a partir de la conversión de los extractos celulósicos del mismo mediante síntesis de Cannizzaro.

Específicos

1. Producir mediante el método Kraft para la hidrólisis alcalina de la celulosa presente en el culmo del bambú, convirtiéndola en azúcares ácido y azúcares alcohol.
2. Evaluar el rendimiento de conversión de azúcares ácido mediante la reacción de Fehling por gravimetría.
3. Establecer una relación empírica de rendimiento mediante el contenido de producto cúprico (CuO) de la reacción de Fehling respecto al contenido de cobre en la solución original del reactivo de Fehling.

INTRODUCCIÓN

El bambú presenta características que lo hacen ser una planta versátil, específicamente el género *Guadua*, el cual presenta características de gran utilidad para la construcción de estructuras con materiales alternativos al acero o al concreto, siendo el primero de fácil obtención y económicamente más barato. En años recientes se ha estudiado las propiedades del bambú, así como sus características y debilidades, encontrándose así que este presenta propiedades físico-mecánicas excelentes para la construcción, pero, también, es un material muy propenso al ataque de plagas, lo que trae como consecuencia el daño permanente de las estructuras hechas con bambú, haciéndolas inestables, inhabitables y poco factibles.

De aquí surge la necesidad de encontrar un método de preservación del bambú que sea eficiente; el planteamiento y diseño de un método que utilice los sobrantes del bambú para que, por medio de la extracción de la celulosa presente en la madera del bambú, pueda sintetizarse un compuesto que cambie las propiedades organolépticas de dicho material e inmunizarlo contra el ataque de insectos y plagas. Durante la elaboración de este método existió la limitante de obtener información que ayudara a la propuesta del método, por lo que se planteó la metodología proponiendo una teoría de la conversión de la celulosa por tratamiento con álcali y, posteriormente, con ácido, para obtener como producto final la sal de un ácido carboxílico.

En primer lugar, se estudió las propiedades del bambú del género *-Guadua angustifolia-* para así plantear las generalidades en las cuales se basa el método. Después se estudiaron los componentes del bambú y las proporciones de éstos, con el fin de conocer la cantidad de celulosa máxima que podía extraerse de ésta planta. Conociendo esta información se planteó la reacción general y el mecanismo de reacción para la conversión de la celulosa a ácidos carboxílicos menores, con el planteamiento anterior se determinaron las cantidades estequiométricas necesarias para efectuar las reacciones con el objetivo de plantear la metodología, a nivel de laboratorio para realizar la síntesis.

Posteriormente, se evaluó la cinética de la reacción y se calculó el porcentaje de conversión o rendimiento de la reacción para determinar la eficiencia del método.

Se determinó que es posible sintetizar un ácido carboxílico, a partir de la celulosa proveniente del culmo del bambú, pero en una cantidad mínima haciendo el método poco eficiente. Cabe resaltar que al no existir documentación acerca de éste experimento no puede compararse los resultados obtenidos con datos anteriores para determinar si el resultado fue deficiente. Para esto, evaluarse el método con respecto a otros, además de evaluar si el ácido sintetizado posee o no las propiedades de un preservante para maderas.

Esta propuesta deja como inquietud el estudiar las propiedades químicas de los componentes de las maderas y si éstos pueden utilizarse como preservantes, con el fin de que este tipo de preservación pueda crear proyectos autosostenibles de construcción y preservación de estructuras hechas con bambú.

1. ANTECEDENTES DEL BAMBÚ

En época reciente el bambú, al igual que otras tecnologías basadas en materiales naturales se encuentra atravesando una revisión de sus potencialidades como material de construcción. (5-4)

Sus características y propiedades lindan en lo increíble: la primera especie vegetal en haber soportado la mortífera radiación de la bomba atómica de Hiroshima, al ser utilizada para recuperar áreas verdes en el epicentro de su explosión con 1100 especies distribuidas a través de la totalidad del planeta, con excepción de la Antártida; con alturas que varían según la especie desde unos cuantos centímetros hasta más allá de los 50 metros creciendo en algunos casos a una velocidad de un metro diario; alcanzando diámetros de tallo de hasta 30 cm.; soportando un rango de temperaturas ambientales entre los 20 °F y los 120 °F; una hermosa, extraña planta primitiva integrada desde los más remotos tiempos al destino de la humanidad a través de mil usos incluyendo comida, bebida, papel, ropa, medicinas..

Ecológicamente, un recuperador de tierras agotadas; una bomba natural de oxígeno ambiental; un recurso de invaluable utilidad en la estabilización y rescate de terrenos erosionados y ambientalmente degradados.

Y en el área de construcción, un recurso inagotable infraestructural, estructural y de servicios en vivienda y otros tipos de edificaciones. Superior al acero normal en fuerza tensil y al concreto en compresión; suplidor de mobiliario, esteras, revestimientos, pisos, tabiques, instalaciones sanitarias,

techos, estructura y encofrados entre muchos otros usos. Bendición de las regiones económicamente deprimidas ofreciendo soluciones económicas y vernáculas a las necesidades habitacionales de millones de desamparados.

1.1 Generalidades del bambú

Bambú es el nombre común de un conjunto de plantas vivaces, leñosas, de porte arbustivo o arbóreo, agrupadas en unos 45 géneros y 480 especies de la familia de las Gramíneas. El bambú crece sobre todo en regiones tropicales y subtropicales, desde el nivel del mar hasta las zonas cubiertas por nieves perpetuas; sólo algunas especies se extienden hasta las regiones templadas. Es muy abundante en el sureste de Asia y hay algunas especies en América y África, y ninguna en Australia. El porte oscila entre el de los carrizos rígidos de aproximadamente 1 m de altura, y gigantes de hasta 50 m de altura y 30 cm. de diámetro cerca de la base. Casi todos los bambúes son erectos, pero algunas especies tienen tallos flexibles que forman espesuras impenetrables.

Figura 1. Plantación de bambú, Santa Bárbara Suchitepéquez.



1.1.1 Estructura y Características

El bambú se reconoce fácilmente por los tallos articulados leñosos, o cañas, formados por secciones huecas llamadas entrenudos, separadas por tabiques sólidos llamados nudos. En cada nudo, una vaina protege una yema, que a su vez puede dar lugar a una rama o a una inflorescencia. Los tallos de bambú brotan de rizomas (tallos engrosados) subterráneos horizontales. Los ápices de los brotes nuevos están protegidos por escamas imbricadas que se forman a medida que se alargan los entrenudos. En un principio los brotes nuevos crecen despacio, pero el ritmo aumenta muy rápido y puede llegar a 60 cm. diarios en algunas especies tropicales gigantes. El tallo principal no tiene hojas y no suele ramificarse hasta no haber alcanzado toda su longitud. Las ramas crecen a partir de las yemas de los nudos, y pueden a su vez emitir ramas secundarias y hasta terciarias; estas últimas son las que portan las hojas, casi siempre rectas, planas y multinerviadas, características del bambú.

Figura 2. Culmo y entrenudos del bambú, plantación de bambú Santa Bárbara Suchitepéquez.



Las cañas de bambú son verdes porque contienen abundante clorofila en los tejidos situados inmediatamente bajo la superficie. Esto significa que las cañas forman una superficie fotosintética importante, sobre todo porque crecen antes de que se desarrollen las hojas.

La estructura floral del bambú es básicamente la normal en la familia de las gramíneas. No obstante, varios detalles de la flor demuestran que los bambúes son gramíneas primitivas. En efecto, la flor del bambú tiene seis lodículas (escamas dispuestas en la base del ovario), seis estambres y tres estigmas (estructuras de germinación del pistilo), en lugar de las dos lodículas, tres estambres y dos estigmas típicos de casi todas las gramíneas. Además, aunque muchos bambúes florecen anualmente, son también muy numerosos los que florecen una vez cada varios años. Todos los miembros de una especie florecen al mismo tiempo, y las plantas mueren después de florecer y formar las semillas. Las especies individuales se perpetúan mediante semillas y emitiendo nuevas cañas a partir de los rizomas; una especie puede tardar varios años en establecerse por sí sola.

1.1.1.1 Clasificación botánica

Hay dos tipos básicos de bambú: leñoso y herbáceo.

Los bambúes leñosos pertenecen a un sola especie, *Bambuseae*, mientras que los herbáceos se ubican según un número de especies separadas: *Olyreae*, *Streptogyneae*, *Buergersiochloaeae*, *Guaduelleae* y *Puelieae* (Clark et al. 1995). A estas últimas es a la que se hace referencia específicamente a las *Guaduelleae* y en especial *Guadua angustifolia* que constituye la base de la revolución constructiva actualmente en marcha en Latinoamérica

1.1.1.2 Origen, hábitat, especies, velocidad de crecimiento y maduración

Todos los continentes, excepto Europa, cuentan con bambúes indígenas. El ámbito natural del bambú abarca las diferentes regiones del mundo, (a excepción de la Antártida y otras zonas de frío riguroso y alturas extremas) prosperando preferentemente en el Asia y en América. En este último caso, se extiende desde la latitud 40° N hasta la 47° S abarcando en ese ámbito Estados Unidos, México, Centro y Suramérica (donde la *Guadua* concentra su mayor importancia) y la región Caribeña. Más específicamente, la especie *Guadua* se extiende desde 27° N en el noroeste mexicano hasta 33° S a nivel de Argentina y Uruguay.

Existen aproximadamente 90 géneros y 1100 especies de bambú en el mundo, cerca de la mitad de los cuales habita en América extendiéndose. En América Latina, el género *Guadua* es muy importante: *G. angustifolia* en Colombia y Ecuador, *G. amplexifolia* desde el norte de Venezuela hasta Nicaragua y Honduras, *G. inermis* en México y *G. superba* en el Brasil. A mayores altitudes y en los climas templados de América Latina, el género *Chusquea* es muy importante. Existen más de 400 especies nativas de Latinoamérica entre las que destaca la *Guadua angustifolia*, de cultivo ideal y fácil desarrollo para aplicaciones en construcción.

El bambú se reproduce casi exclusivamente a partir de sus rizomas y crece con extremada rapidez alcanzando su máxima altura en un lapso de 3 a 4 meses y su madurez completa entre los dos y los tres años a partir de su nacimiento en lo que representa un corto ciclo de crecimiento.

1.1.1.3 La raíz

El sistema radicular está conformado por raíces adventicias y fibrosas, y por los rizomas que corresponden a modificaciones del tallo, de tipo paquimórfico (crece hacia afuera), en su conjunto son fuertes, abundantes y de la activación de las yemas se generan nuevos rizomas y por ende nuevos tallos.

1.1.1.4 El culmo

El culmo una vez emerge del suelo lo hace con el máximo diámetro. Un tallo adulto tiene una altura entre 18 y 22 m., es leñoso, recto, y ligeramente arqueado en la punta, formado por nudos y entrenudos huecos. De acuerdo a su variedad o forma presentan características especiales, (distancia entre nudos, diámetro, espesor de las paredes, color, entre otros).

Figura 3. Parénquima de bambú sin preservar, coloración natural, diferentes aumentos.

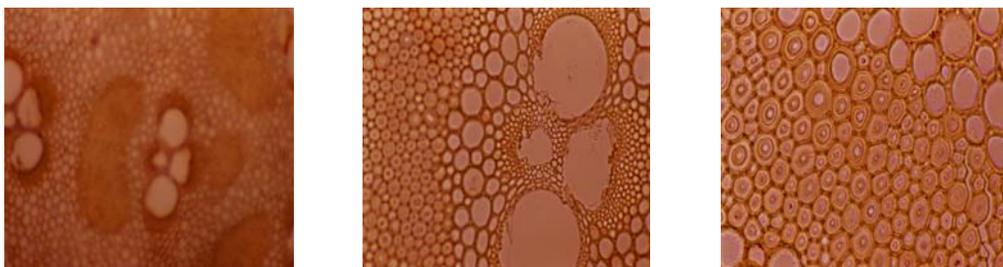


Figura 4. Algunas características botánicas básicas del bambú.



1.1.2 Especificaciones

1.1.2.1 Energía calórica

El bambú produce más de 7,000 kilocalorías por kilogramo, superior a la madera y la mitad de lo correspondiente al petróleo crudo. El carbón de bambú, como tal, posee un vasto potencial de aplicación.

1.2 Beneficios, usos generales y productos

1.2.1 Usos cronológicos

En función de su tiempo de vida se puede agrupar los usos del bambú de la siguiente forma:

<30 días bueno para comer.

6-9 meses para hacer cestas,

2-3 años para elaborar tabiques y laminados.

3-6 años para construcción.

1.2.2 Diversificación de productos

El bambú desempeña un papel vital para la vida socio-económica de las comunidades que se benefician de su utilización y un impacto ambiental en el devenir de las mismas: es un recurso natural renovable a corto plazo con relación a otras maderas, biodegradable, con más de un millar de usos, con una enorme diversificación de productos: materia prima de bajo costo para vivienda y construcción; recurso de decoración; mobiliario de todo tipo; recuperador, conservador y estabilizador de suelos; cercas para el ganado; regulador de sistemas hídricos; herramientas agrícolas; implementos de cocina; instrumentos musicales y de artesanía; bastones; medicinas contra el asma, tos y enfermedades del riñón, entre otras); materia prima para elaboración de juguetes, perfumes y papel; fuente de alimentación para seres humanos y animales; preservativo de alimentos e inhibidor de crecimiento bacteriológico; desodorante ambiental; fijador de dióxido de carbono; purificador de agua; deshumidificador; combustible vegetal, entre muchos otros.

1.2.3 Combustible

Posee un importante potencial de uso tanto en la producción de energía calórica como en la desodorización de ambientes, debido a que en su constitución, casi tres veces más porosa que la de la madera, intervienen muchos minerales (como hierro, manganeso y potasio), y muy pocas impurezas. Una vez utilizado inicialmente, el carbón de bambú puede ser reciclado muchas veces después de haberse limpiado, hervido y secado al sol.

1.3 Virtudes y fortalezas

El bambú es la planta más resistente del reino vegetal. Comparable con el acero en fuerza de tracción y con el concreto en fuerza de compresión, es único en ese doble sentido. Mientras su fuerza a la tensión se mantiene igual a lo largo de la vida de la planta, su resistencia a la compresión se incrementa en el tiempo.

1.3.1 Comportamiento ambiental

El bambú constituye una herramienta para conservación de suelos. Sus propiedades para combatir la erosión permiten crear condiciones favorables en vertientes y cuencas, en riberas de ríos con tendencia a la fragilidad ecológica, en áreas deforestadas y en lugares propensos a movimientos sísmicos y a deslizamientos de barro. Así mismo, combate efectivamente la erosión causada por el escurrimiento de tierras durante las lluvias.

1.4 Debilidades y protección

1.4.1 Insectos y plagas

Una debilidad del bambú es que este material es muy fácilmente atacado por insectos y plagas. El sistema tradicional para conservar bambú consiste en inmunización a través del uso de fuertes y tóxicos químicos que son muy eficaces para este proceso, pero también muy dañinos para la naturaleza, el ambiente y las personas que viven en casas de bambú tratado de esta forma y de aquellos que trabajan con ellos. También se acostumbra, en el ámbito rural, utilizar bambú maduro (más de 4 años) y el sumergir en agua el tallo del bambú a utilizar por una permanencia de 5-7 días. En Latinoamérica, el bambú estructural se viene tratando con boratos (solución de 3-10 % de una mezcla

por partes iguales de borax más ácido bórico) introducido en el bambú mediante un compresor de aire, con el fin de crear una atmósfera de 20-30 lb de presión) para crearle una prolongada protección en el tiempo contra insectos y hongos.

Un nuevo sistema inspirado por sistemas de la preservación orientales ha sido probado localmente. El uso del ácido pirolítico de bambú, aplicado periódicamente al bambú, asegura la preservación por un mínimo de 50 años. Este tipo de preservación crea pequeñas industrias locales con una inversión mínima. La energía necesitada viene de los sobrantes del mismo bambú.

1.4.2 Deterioro Biológico

Debido a su baja resistencia al deterioro biológico la vida útil de estructuras de bambú varía desde 1 año, caso de estar en contacto directo con el terreno, hasta 30 años o más cuando se emplea bajo condiciones favorables como el uso de esteras de bambú cubiertas de cemento y de mortero para servir como tabiquería.

1.4.3 Protección contra incendios

El riesgo de incendio es más alto en el bambú que en la madera. Para proteger al bambú contra el fuego se utiliza yeso. En el caso del bambú estructural es importante no perforar el *septum* (que es la membrana rígida que separa al interior del bambú en módulos estancos) dado que esa es la parte que garantiza la fuerza del bambú.

2. CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DEL BAMBÚ (*Guadua angustifolia*)

2.1 Composición química orgánica

La composición del culmo del bambú del género *Guadua angustifolia* se presenta a continuación:

Tabla I. Caracterización química del culmo género *Guadua*

Características	Guadua
Extractivos agua caliente (%)	5,33
Extractivos A-B (%)	4,04
Azúcares reductores (%)	1,01
Celulosa (%)	52,34
Lignina (%)	22,14

Fuente: Katia Manzanares Ayala. **Aptitud de algunas especies de bambúes para uso en la construcción.**

2.1.1 Componentes activos del bambú

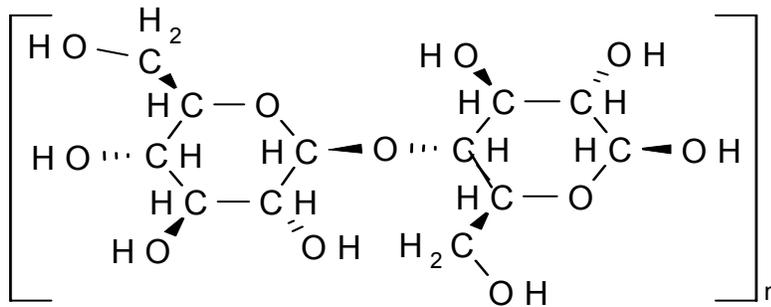
2.1.1.1 Celulosa

La celulosa (del latín, cellula, 'celda pequeña'), hidrato de carbono complejo; es el componente principal de la pared de todas las células vegetales. En las plantas, la celulosa suele aparecer combinada con sustancias leñosas, grasas o gomosas. La hidrólisis completa de la celulosa da solamente D-glucosa y su hidrólisis parcial efectuada cuidadosamente da celobiosa. La formación de celobiosa muestra que las unidades de glucosa en la celulosa están unidas por enlaces beta. Por ello la celulosa es un polímero lineal de gran

número de unidades de β -D-glucosa unidas por el carbono-1 de una unidad al carbono -4 de la siguiente. (8-672)

La estructura puede escribirse de la siguiente forma:

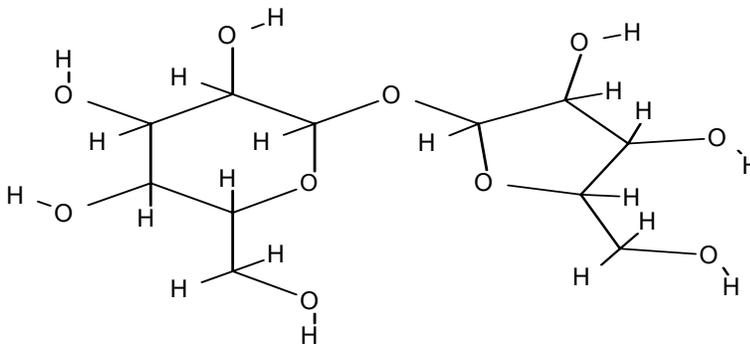
Figura 5. Estructura de la celulosa.



2.1.1.2 Oligosacáridos

Los oligosacáridos más comunes y más importantes son los disacáridos. Los disacáridos son todos ellos glucósidos de una clase especial, en la cual el grupo R- es otro monosacárido, de estos la sacarosa es el más común. La mayoría de vegetación posee oligosacáridos, debido a la fotosíntesis de estas.

Figura 6. Estructura de la sacarosa



Fuente: Lee-Van Orden. **Química General**. Pág. 672.

3. PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DE LOS CARBOHIDRATOS

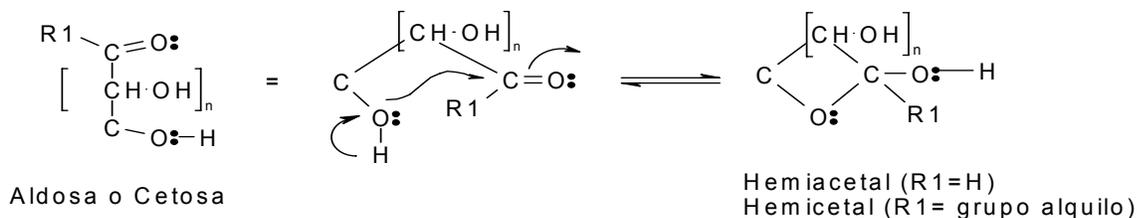
3.1 D-Glucosa: Mutarrotación

Los acetales y cetales o hemiacetales y hemicetales se forman a partir de la reacción de aldehídos o cetonas con alcoholes o glicoles en condiciones catalizadas por ácido o en ciertos casos, catalizadas por bases.

En condiciones de catálisis ácida se puede sintetizar el derivado acetal o hemiacetal (o cetal o hemicetal). (Las condiciones de catálisis básica producen únicamente el hemiacetal o el hemicetal). Considerando la reacción de catálisis ácida, la conversión de un compuesto carbonilo (tómese un aldehído por ejemplo) a un hemiacetal y subsecuentemente a un acetal es reversible. La reacción favorece al hemiacetal/acetal sólo si hay un gran exceso de alcohol y si se usa ácido anhidro como catalizador. La eliminación de agua a medida que se forma es normalmente esencial para una reacción completa. (7-1444)

A diferencia del hemiacetal y hemicetal, los cuales son compuestos bastantes lábiles e inestables, los hemiacetales y hemicetales de los carbohidratos son bastante estables. De hecho la mayoría de los carbohidratos existen sobre todo en sus formas de hemiacetal o hemicetal. Este equilibrio se muestra aquí en un sentido general:

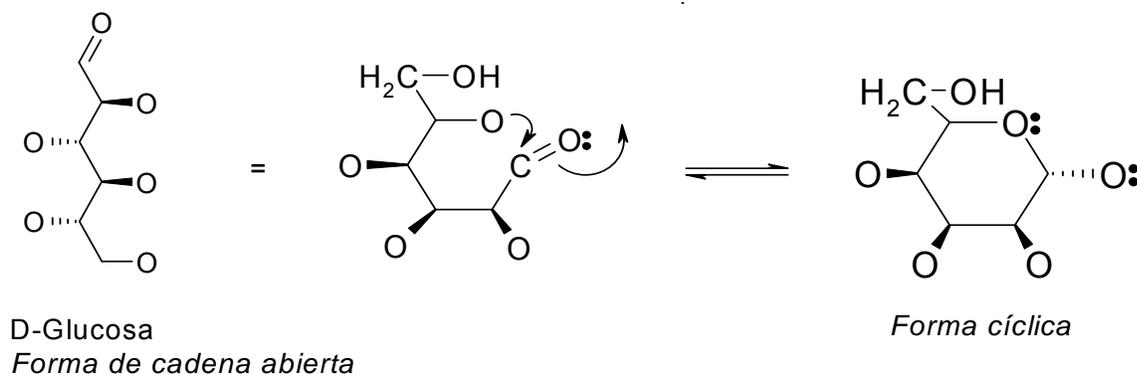
Figura 7. Equilibrio entre cetales/acetales y hemiacetales/hemiacetales.



Fuente: Wingrove Allan S. **Química Orgánica**. Pág. 1445.

La forma abierta del carbohidrato puede experimentar una reacción intramolecular del tipo anterior, y formar un carbohidrato cíclico que contiene un grupo hemiacetal o hemicetal. Éste es el ejemplo de la tautomería de ciclo-cadena. La reacción aplicada a la D-Glucosa es:

Figura 8. Mutarrotación de la D-Glucosa.



Fuente: Wingrove Allan S. **Química Orgánica**. Pág. 1446.

Aun cuando es posible formar ciclos de tres-, cuatro-, cinco-, seis- o siete miembros (usando los oxígenos de los hidroxilos de los carbonos 2, 3, 4, 5 ó 6, respectivamente), la D-Glucosa se encuentra sobre todo en forma de un anillo de seis miembros. Termodinámicamente, se favorece la forma del anillo de seis miembros. En general, en cualquier reacción intramolecular se ve favorecida

energéticamente (termodinámicamente) la formación de anillos de cinco y seis miembros con respecto a la de anillos más pequeños o más grandes. (7-1446)

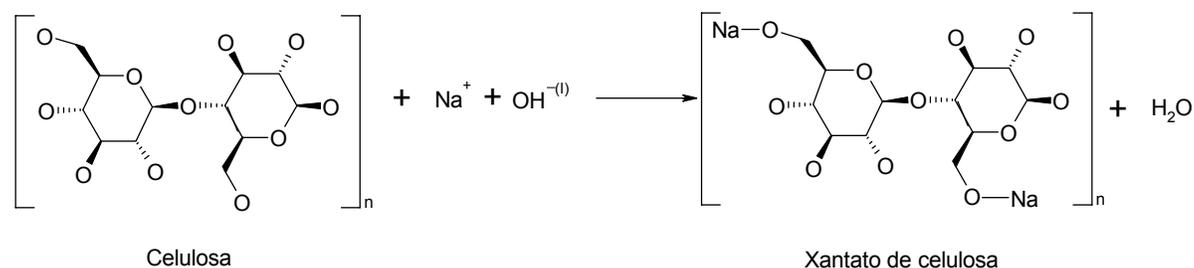
Al comparar los anillos de cinco y seis miembros, los estudios muestran que los primeros suelen formarse con más rapidez, pero si se dejan que lleguen a un equilibrio, el segundo es el producto más estable. (7-1447)

3.2 Reacciones de los carbohidratos.

3.2.1 Derivados químicos de la celulosa

Las formas modificadas de la celulosa han sido muy importantes en el comercio por muchos años. La modificación de la celulosa puede producirse a través de una solubilización y/o reprecipitación, con lo cual se obtiene una modificación en su estructura física, como en la producción del rayón, o por el efecto permanente de los cambios químicos a través de reacciones que se llevan a cabo en los hidroxilos libres (en el C-2, C-3 y el C-6) el primer hidroxilo en ser modificado es el C-6. Los derivados más importantes de la celulosa son los ésteres (acetatos, xantatos, nitratos, etc.) y los éteres (metil éteres, carboximetil ésteres, etc.) (1-703)

Figura 9. Conversión de la celulosa a xantato de celulosa en medio alcalino.



Fuente: Frederick G. Bordwell. **Organic Chemistry**. Pág. 703

3.2.2 Desproporcionamiento. Reacción de Cannizzaro

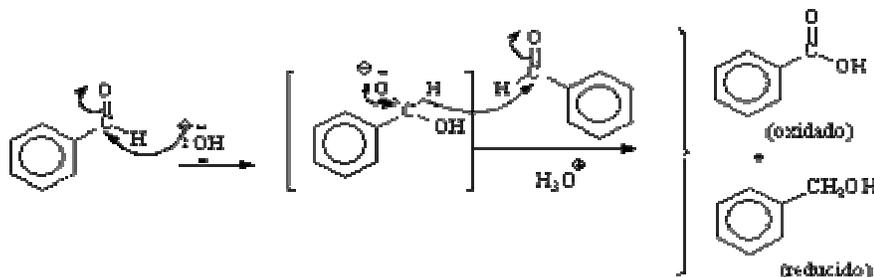
Podría esperarse que los aldehídos que no tienen hidrógenos α no sean reactivos en solución básica en ausencia de cualesquiera otros reactivos (halógenos u otros aldehídos y cetonas); no obstante, en una base acuosa concentrada, tales aldehídos experimentan una reacción interesante y, a menudo útil. (2-256)

Los aldehídos sin ningún hidrógeno en el carbono α experimentan auto-redox (desproporcionamiento) en álcalis calientes concentrados, por ejemplo:



La reacción de Cannizzaro ocurre por adición nucleofílica de ion hidróxido al aldehído para formar un intermediario tetraédrico, que libera ion hidruro como grupo saliente. Un segundo equivalente de aldehído acepta entonces el ion hidruro en otro paso de adición nucleofílica. El resultado neto es que una molécula de aldehído experimenta sustitución acíclica de hidruro por hidróxido, de modo que se oxida para convertirse en un ácido, mientras que una segunda molécula de aldehído experimenta una adición de hidruro y, por tanto, se reduce para convertirse en un alcohol.

Figura 10. Intermediario tetraédrico en la reacción e Cannizzaro



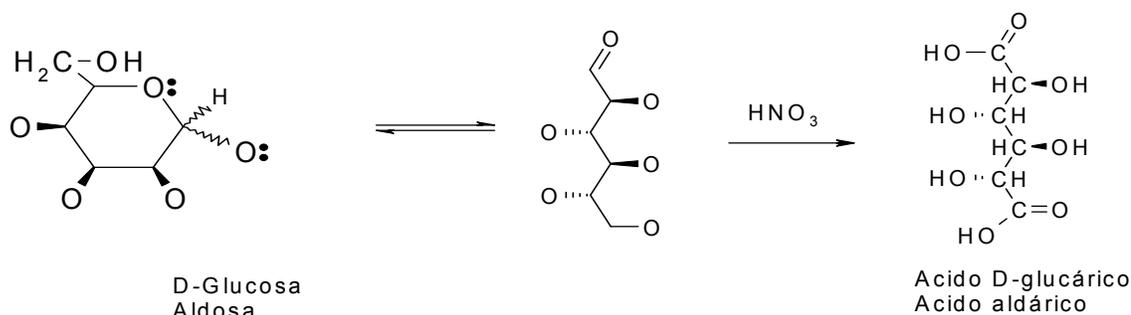
Fuente: Frederick G. Bordwell. **Organic Chemistry**. Pág. 703.

La reacción de Cannizzaro tiene pocas aplicaciones prácticas y se limita al formaldehído y los benzaldehídos sustituidos.

3.2.3 Reacción con ácido nítrico

Un agente oxidante mucho más fuerte que el bromo en agua, el ácido nítrico, oxida aldosas a los correspondientes ácidos aldáricos, en los que los dos extremos del carbohidrato, el extremo del aldehído y el $-\text{CH}_2\text{OH}$ se oxidan a ácidos carboxílicos. (7-1468)

Figura 11. Oxidación de la D-Glucosa por tratamiento con ácido nítrico.



Fuente: Wingrove Allan S. **Química Orgánica**. Pág. 1468

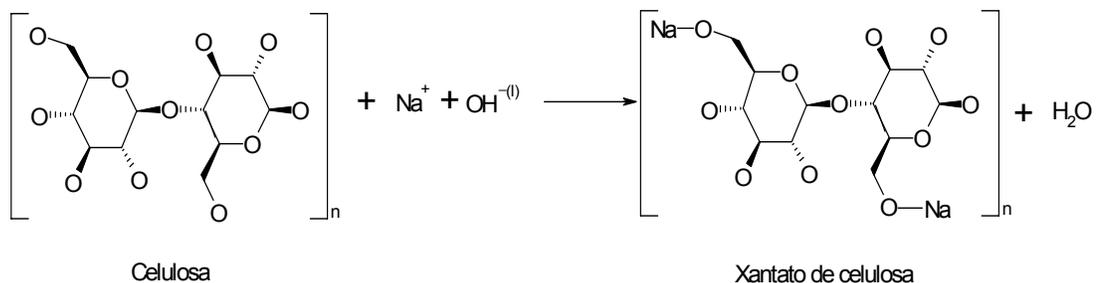
3.2.4 Pruebas de identificación. Reactivos de Benedict y de Fehling

El reactivo de Benedict (citrato cúprico en solución básica) y el reactivo de Fehling (Tartrato cúprico en solución básica) son análogos al reactivo de Tollens en lo que respecta a su reacción con los carbohidratos. En el tratamiento con estos reactivos, los azúcares reductores experimentan una oxidación a una mezcla de varios productos y el ion metálico, Cu^{+2} en este caso, se reduce a Cu^+ , el cual se precipita como óxido cuproso rojo, Cu_2O . (7-1465)

4. PROPUESTA DE LA REACCIÓN GENERAL PARA LA SÍNTESIS DEL ÁCIDO D-GLUCÁRICO A PARTIR DE LA CELULOSA PROVENIENTE DEL CULMO DEL BAMBÚ

4.1 Planteamiento de la reacción general

Como se señaló en el capítulo anterior, al tratar la celulosa con un álcali en presencia de calor, ésta da origen a un intermediario denominado xantato de celulosa $(C_6H_{10}O_6Na)_n$, el primer paso de la reacción ocurriría de la siguiente forma:

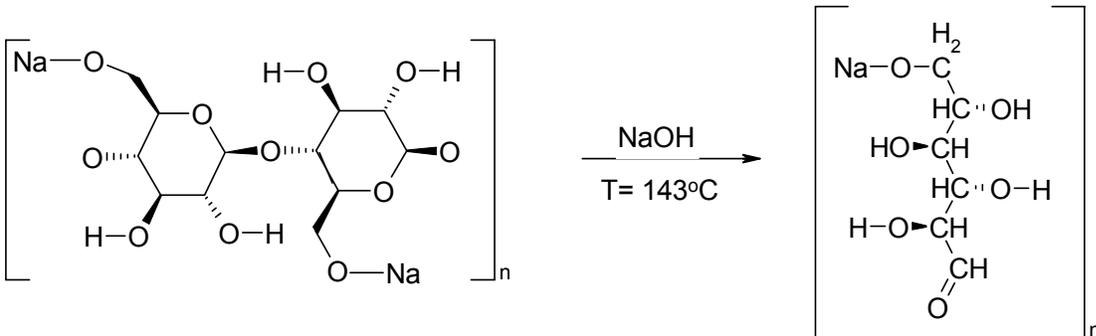


En este paso de la reacción el H^+ proveniente del oxidrilo unido al C-6 de la celulosa es sustituido por el Na^+ del hidróxido de sodio (NaOH), la relación estequiométrica de la reacción es 1:1. El subproducto de la reacción es agua en estado líquido.

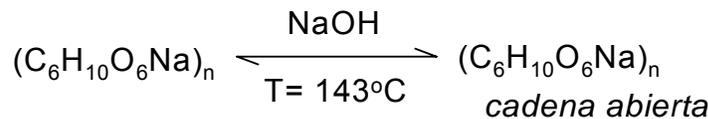
Al tratar nuevamente el producto obtenido de la reacción anterior con álcali a una temperatura de $143^\circ C$ ocurre una pirolisis del xantato de celulosa. De ésta reacción se obtiene $(C_6H_{10}O_6Na)_n$ en forma de cadena abierta, debido a esto los enlaces entre el C-1 y el O del anillo, el C-4 y O se rompen, dando origen a una

estructura de un glucósido (en éste caso la sal de un glucósido) en su forma de cadena abierta, concordando con la teoría que la hidrólisis total de la celulosa produce D-Glucosa.

El siguiente paso de la reacción es:

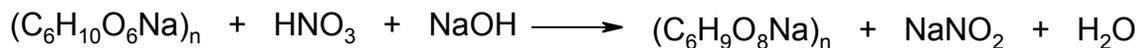


De forma condensada la reacción se presenta así:



En este caso ocurre un cambio estereoquímico en la estructura de la celulosa debido a la ruptura de enlaces y a la hidrólisis de ésta. Par este paso la relación estequiométrica es de 1:1.

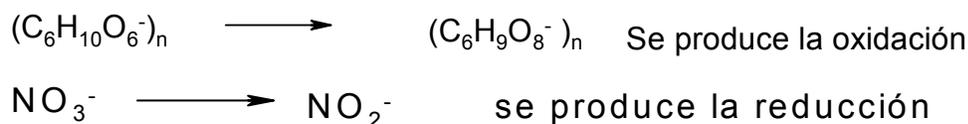
Debido a que se debe obtener el acetal del glucósido, este debe someterse a un auto redox en condiciones de catálisis ácida, para lo cual se utiliza ácido nítrico al 65%, la reacción es la siguiente:



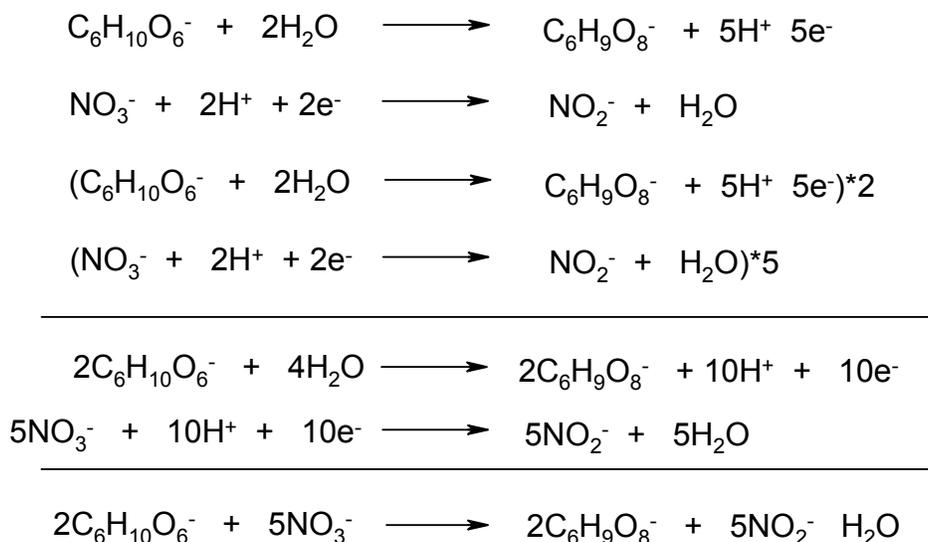
En este caso es necesario balancear la ecuación, ya que de aquí se obtienen las cantidades estequiométricas que se utilizan en la experimentación.

Se realizará el balanceo por el método redox.

La reacción general se divide en dos hemirreacciones, las cuales son:



Las hemirreacciones se balancean de la siguiente forma:



Como las especies reactantes provienen de una reacción en medio básico, existe la presencia de hidróxido sódico, esta especie no tiene una participación directa en ésta reacción pero influye en el rendimiento de la misma, ya que parte de éste hidróxido sódico neutraliza al ácido nítrico presente en la reacción, lo que evita que éste reaccione completamente con el glucósido para formar el ácido D-Glucárico. La reacción balanceada incluyendo las especies espectadoras se presenta de la siguiente forma:

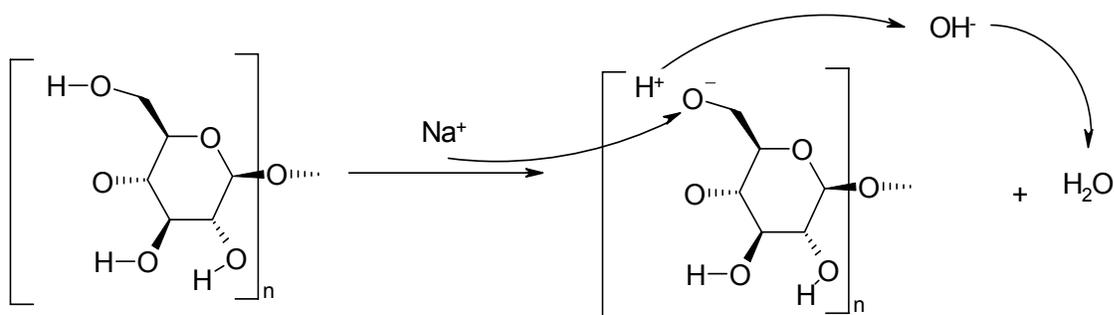


Cabe resaltar que par obtener un rendimiento aceptable de la reacción anterior, el ácido nítrico debe ser el reactivo en exceso, ya que éste debe reaccionar con el hidróxido de sodio presente, además de oxidar al glucósido. Además la ecuación anterior toma en cuenta sólo la participación de un mol de gluconato sódico, para obtener la ecuación global, ésta debe multiplicarse por “n” monómeros de glucosa.

4.2 Planteamiento del mecanismo de reacción empírico

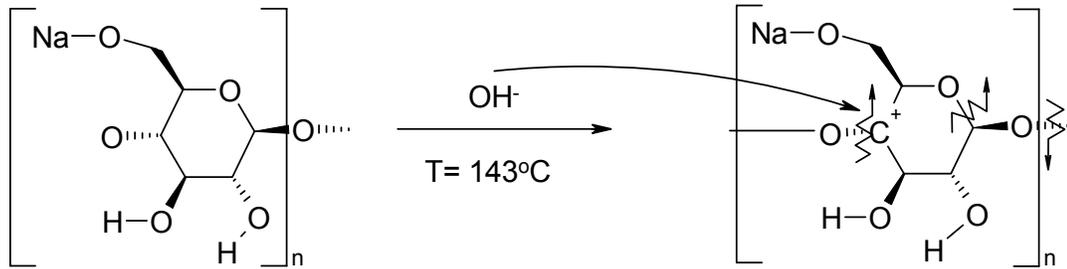
El mecanismo de la reacción que se presenta a continuación es empírico, ya que esta reacción no se ha estudiado anteriormente, cabe resaltar que el mecanismo se basa en la reactividad y afinidad electrónica que las especies participantes poseen según la literatura citada.

Primer paso del mecanismo de la reacción: Conversión de la celulosa a xantato de celulosa (sustitución de un H^+ por un Na^+), el catión Na^+ proveniente del NaOH



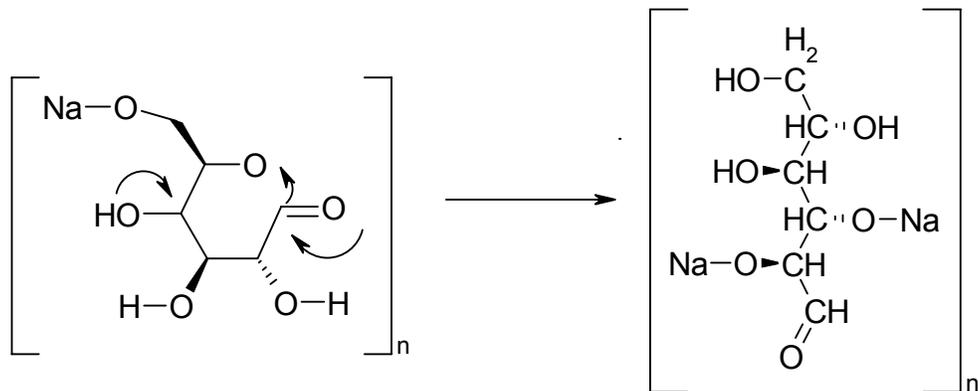
El H^+ proveniente de la celulosa se une al oxidrilo del álcali para formar agua como único producto.

El segundo paso del mecanismo de la reacción es la ruptura del polímero por tratamiento térmico en presencia de álcali a una temperatura de 143°C, lo cual da como resultado la hidrólisis completa de la celulosa por tratamiento con álcali y calor, de la siguiente forma:

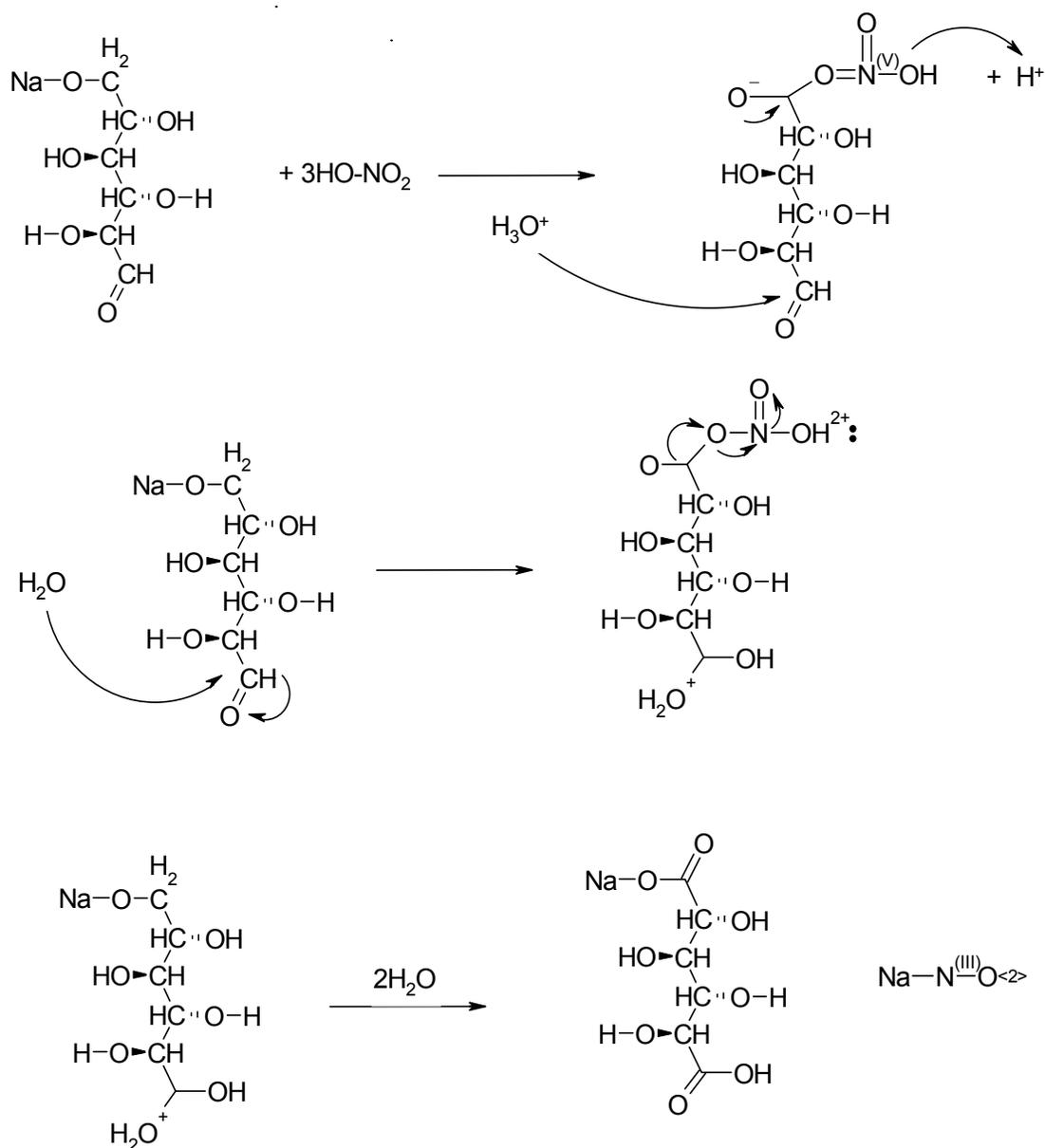


La ruptura de la cadena ocurre en los C-3 y C-6, el C-3 queda deslocalizado al igual que el oxígeno unido al C-6; el oxidrilo proveniente del álcali se une al C-2 para estabilizar la carga de éste, formando así un glucósido de cadena abierta.

Debido a que la celulosa esta formada por monómeros de glucosa y la hidrólisis de ésta da como resultado únicamente glucosa, (en este caso en especial una sal de glucosa debido a la presencia de el Na^+ en la estructura) ésta posee la propiedad de presentarse tanto en su forma cíclica como de cadena abierta, así:



Tercer paso del mecanismo de reacción: El siguiente paso de la reacción es la reducción de la aldosa a su respectivo ácido carboxílico, el ácido nítrico se utiliza como agente oxidante, ya que éste es un oxidante mucho más fuerte y por lo tanto puede esperarse que se de una conversión mayor. En éste caso el agente oxidante ataca a los dos extremos del carbohidrato, el extremo del aldehído y el $-\text{CH}_2\text{OH}$ se oxidan a ácidos carboxílico de la siguiente forma:



En éste paso en el $-\text{CH}_2\text{OH}$ se lleva a cabo una E_2 para formar el grupo carboxilo en el glucósido, y debido a la acidez el extremo del aldehído sufre una oxidación para formar el grupo carboxilo. La etapa de la reacción E_2 es el paso lento del mecanismo y de ésta depende la cinética de la reacción de la síntesis del ácido D-Glucárico.

El ion nitrógeno se reduce al ganar dos electrones (pasa de valencia +5 a valencia +3), con este último paso del mecanismo, la reacción se completa, formando el ácido D-Glucárico el cual posteriormente puede identificarse al hacerlo reaccionar con el reactivo de Fehling o el reactivo de Benedict, en el cual se revela la presencia del ácido por medio de la aparición de un precipitado rojo de óxido cuproso.

5. METODOLOGÍA

5.1 Ubicación

- Laboratorio de ensayo físico-químico de la sección de Química Industrial, del Centro de Investigaciones de Ingeniería de Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Laboratorio del Área de Química de la Escuela de Ingeniería Química de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

5.2 Recurso Humano

- Autor del trabajo de graduación: Fernando Antonio Ramírez Chaclán.
- Asesora del trabajo de graduación: Inga. Telma Maricela Cano Morales.

5.3 Recursos materiales

Para cada repetición de la síntesis del ácido D-Glucárico se utilizó:

- Celulosa, 10 g
- Hidróxido de sodio (NaOH), 200 cm³
- Ácido nítrico (HNO₃), 400 cm³
- Reactivo de Fehling (Sulfato de cobre en solución ácida), 10 cm³

5.4 Equipo y cristalería

- Balón de dos bocas de 500 cm³
- Condensador de Allihn
- Matraces de 600 cm³
- Balones aforados
- Balanza analítica
- Mechero
- Tubos de ensayo
- Vasos de precipitado
- Bomba de vacío
- Embudo
- Papel filtro
- Potenciómetro

5.5 Propuesta del procedimiento

Para la síntesis del ácido D-Glucárico (o la sal de éste), se propone el siguiente procedimiento:

1. Pesar 10 g de bambú previamente pulverizado.
2. En un balón de destilación agregar 200 cm³ de hidróxido de sodio al 50% y 10 g de la muestra (bambú).
3. Armar el equipo de destilación. (Ver figura 12, sección anexos).
4. Calentar la mezcla a una temperatura mayor a los 145°C por 5 horas, hasta apreciar la formación del licor negro.
5. Enfriar la mezcla hasta 45°C.
6. Armar el equipo de filtración al vacío. (Ver figura 13, sección anexos)

7. Filtrar la mezcla, utilizando para ello fibra de vidrio, para separar la fase sólida de la fase líquida.
8. Lavar el filtro para separar el sólido filtrado, hasta que la fase acuosa sea incolora.
9. Secar el sólido lavado a temperatura ambiente por un período de 24 hrs.
10. Calentar la fase acuosa del paso 7, en un equipo de destilación, a una temperatura de 145°C durante 5 hrs.
11. Realizar ataque con ácido nítrico al 65% al sólido obtenido del paso 9.
12. A la fase acuosa obtenido del paso 10 agregarle 375 cm³ de ácido nítrico al 65%, esto debe de realizarse en un baño con hielo agitando la mezcla continuamente, teniendo cuidado de agregar el ácido nítrico en porciones de 10 cm³, (Medir la densidad de la solución).
13. Realizar pruebas de identificación tanto al producto obtenido del sólido como del líquido agregando para ello 15 cm³ de reactivo de Fehling.
14. Filtrar el producto obtenido del paso anterior utilizando un equipo de filtración al vacío y utilizando papel filtro para ello.
15. Secar el producto a temperatura ambiente y preferiblemente en ausencia de corrientes de aire.

5.5.1 Procedimiento para las pruebas de identificación

1. Tomar 5 muestras de 10 cm³ de la solución del paso 12 y verterlas en tubos de ensayo.
2. A los tubos de ensayo del paso anterior agregar 15 cm³ de reactivo de Fehling.
3. Observar los cambios en las soluciones.
4. Filtrar la mezcla de cada tubo de ensayo 24, 48, 72, 96, 120 hrs. respectivamente, con la finalidad de determinar la cinética de reacción.
5. Pesar el filtrado para determinar la cantidad de óxido cuproso formado.

5.6 Diseño experimental

El experimento comprende 3 corridas, las cuales a su vez están comprendidas de 5 muestras para cada corrida, cada corrida comprende la extracción de celulosa de una muestra pulverizada de bambú (*Guadua angustifolia*). Para la extracción se utilizará los principios del método de Kraft y ésta comprenderá de un calentamiento continuo por un período de 5 horas para las tres corridas respectivas.

5.6.1 Variable respuesta

La variable respuesta es la cantidad de óxido cuproso (Cu_2O) obtenido de las pruebas de identificación realizadas al extracto obtenido y el rendimiento o eficiencia de la reacción, para las tres corridas realizadas.

Se realizaran 3 corridas, con la finalidad de observar la desviación que ocurre entre éstas:

Un tipo de materia prima

Una cantidad constante de masa de materia prima de 10 g

Número de repeticiones = 3 experimentos* 5 muestras = 15 corridas o experimentos.

5.7 Análisis estadístico

Se realizó un análisis de varianza simple, ya que únicamente se cuantificó la proporción de ácidos carboxílicos-celulosa presentes en las muestras, para esto se realizaron 5 corridas de tres muestras de bambú de la especie *Guadua angustifolia*, la matriz se presenta de la siguiente manera:

Tabla II. Arreglo matricial de los datos obtenidos de la proporción celulosa-ácido carboxílico para n muestras y n+2 corridas.

Muestra	C	O	RR	I	DA	Total
1	$Y_{1,1}$	$Y_{1,2}$	$Y_{1,3}$	$Y_{1,4}$	$Y_{1,5}$	Y_1
2	$Y_{2,1}$	$Y_{2,2}$	$Y_{2,3}$	$Y_{2,4}$	$Y_{2,5}$	Y_2
3	$Y_{3,1}$	$Y_{3,2}$	$Y_{3,3}$	$Y_{3,4}$	$Y_{3,5}$	Y_3
Media	\tilde{y}_1	\tilde{y}_2	\tilde{y}_3	\tilde{y}_4	\tilde{y}_5	Y_i
Coeficiente de variación	CV_1	CV_2	CV_3	CV_4	CV_5	

Y_i = Total de corridas realizadas en el experimento bajo la i-esima muestra

\tilde{y}_i = Promedio de las corridas bajo la i-esima muestra, entonces sea Y la suma de todas las muestras e \tilde{y} la media de las corridas en cada muestra.

Entonces si, $\tilde{y}_1 = \tilde{y}_2 = \tilde{y}_3$, existe uniformidad en la conversión de celulosa-ácido carboxílico en cada una de las muestras.

Coeficiente de Variación (desviación estándar relativa)

$$CV = \left(\frac{S}{X} \right) * 100$$

Donde S es la desviación estándar y X es la media de los datos. Para un análisis de laboratorio no debe ser mayor al 10%.

Comparación de la media con los valores obtenidos de cada corrida

Para esto se utilizó la prueba de la t de Student

$$t = \frac{(X - \mu)}{S * \sqrt{n}}$$

Donde: n = número de datos S = desviación estándar

X = media aritmética μ = valor conocido

Para esta prueba se calcula t a partir de la fórmula y se compara con la t de la tabla (n-1) grados de libertad y (l) nivel de confianza. Si t calculada es mayor que t de la tabla, hay una diferencia significativa en el valor de la media y el valor conocido.

6. RESULTADOS

Tabla III. Relación estequiométrica teórica del equilibrio de la reacción redox del ácido D-Glucárico.

	Reactivos			Productos		
	moles de $C_6H_{10}O_6Na$	moles de HNO_3	moles de $NaOH$	moles de $C_6H_9O_8Na$	moles de $NaNO_2$	moles de H_2O
Inicio	0.032280552	6	5	0	0	0
Equilibrio	0	0.88	0	0.032280543	5	6

Fuente: Datos calculados, sección anexos

Tabla IV. Cantidades esperadas de las especies participantes en la cinética de la reacción del ácido D-Glucárico, muestra A.

tiempo (min)	moles de $C_6H_9O_8Na$	moles de $CuSO_4$	moles de Cu_2O	moles de $Cu(OH)_2$
0	0.0010145	0.025	0	0
1440	0.0009548	0.002	0.0001365	0
2880	0.0008456	0.0011054	0.0004398	0
4320	0.0005623	0.00223886	0.0005623	0
5760	0.0004398	0.0014859	0.0008456	0
7200	0.0001365	0.00275152	0.0009548	0
8640	0	0.0021867	0.0010145	0

Fuente: Datos calculados, sección anexos

Tabla V. Cantidades esperadas de las especies participantes en la cinética de la reacción del ácido D-Glucárico, muestra B.

tiempo (min)	moles de $C_6H_9O_8Na$	moles de $CuSO_4$	moles de Cu_2O	moles de $Cu(OH)_2$
0	0.03228	0.025	0	0
1440	0.032070318	0.0224121	0.000209682	0.002378152
2880	0.032123743	0.019605659	0.000156257	0.005238085
4320	0.031965489	0.020144449	0.000314511	0.00454104
5760	0.031972478	0.020233443	0.000307522	0.004459035
7200	0.0319585	0.018671616	0.0003215	0.006006884
8640	0.031147762	0.021540863	0.001132238	0.002326899
10080	0.030328594	0.023804859	0.001951406	0

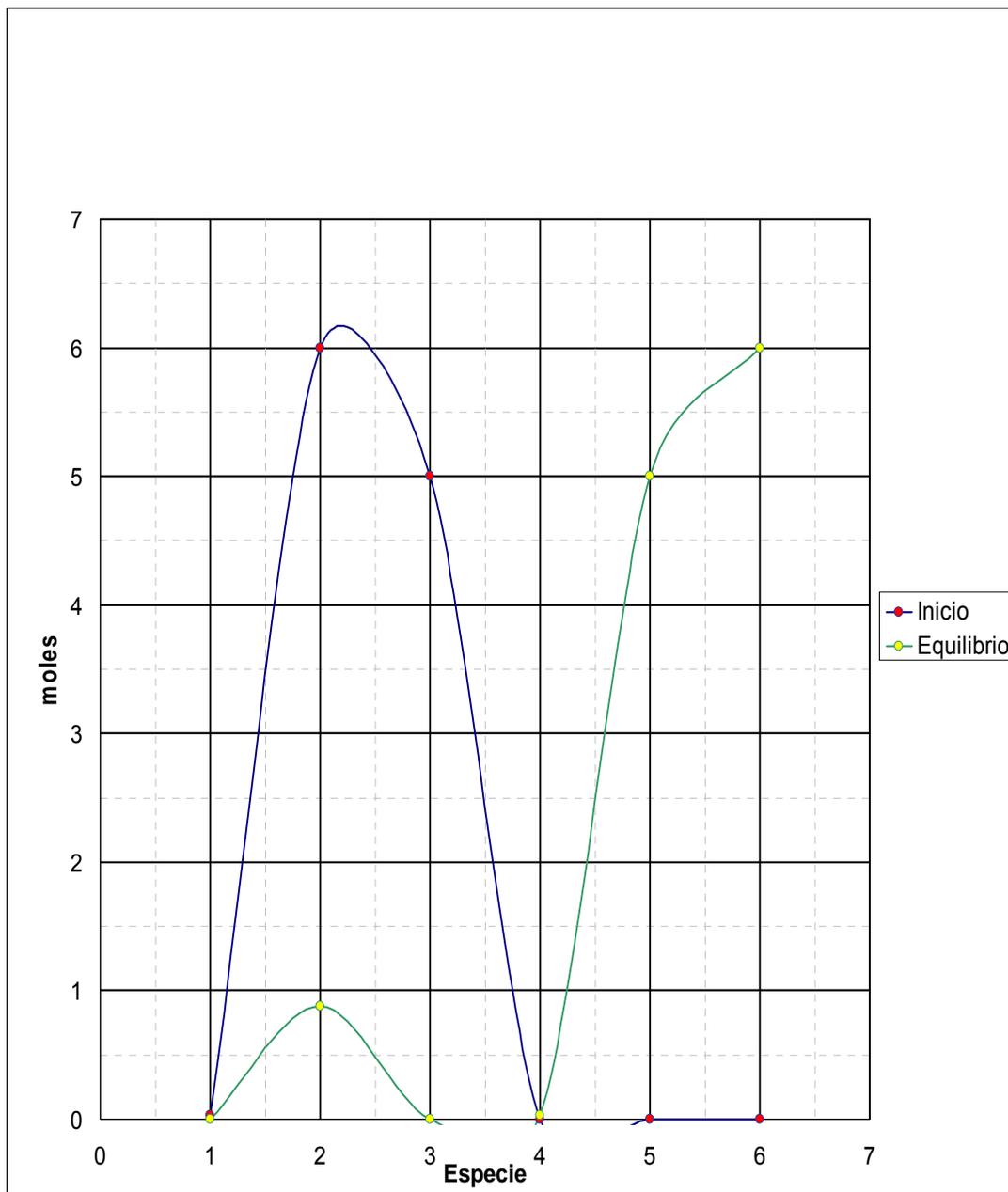
Fuente: Datos calculados, sección anexos.

Tabla VI. Cantidades esperadas de las especies participantes en la cinética de la reacción del ácido D-Glucárico, muestra C.

tiempo (min)	moles de $C_6H_9O_8Na$	moles de $CuSO_4$	moles de Cu_2O	moles de $Cu(OH)_2$
0	0.03228	0.025	0	0
1440	0.032105272	0.0221396	0.000174728	0.002685672
2880	0.032147207	0.021351232	0.000132793	0.003515975
4320	0.032063337	0.019811769	0.000216663	0.004971568
5760	0.032021402	0.019831338	0.000258598	0.004910064
7200	0.031762805	0.021192344	0.000517195	0.00329046
8640	0.030994001	0.021223092	0.001285999	0.002490909
10080	0.030022512	0.022742512	0.002257488	0

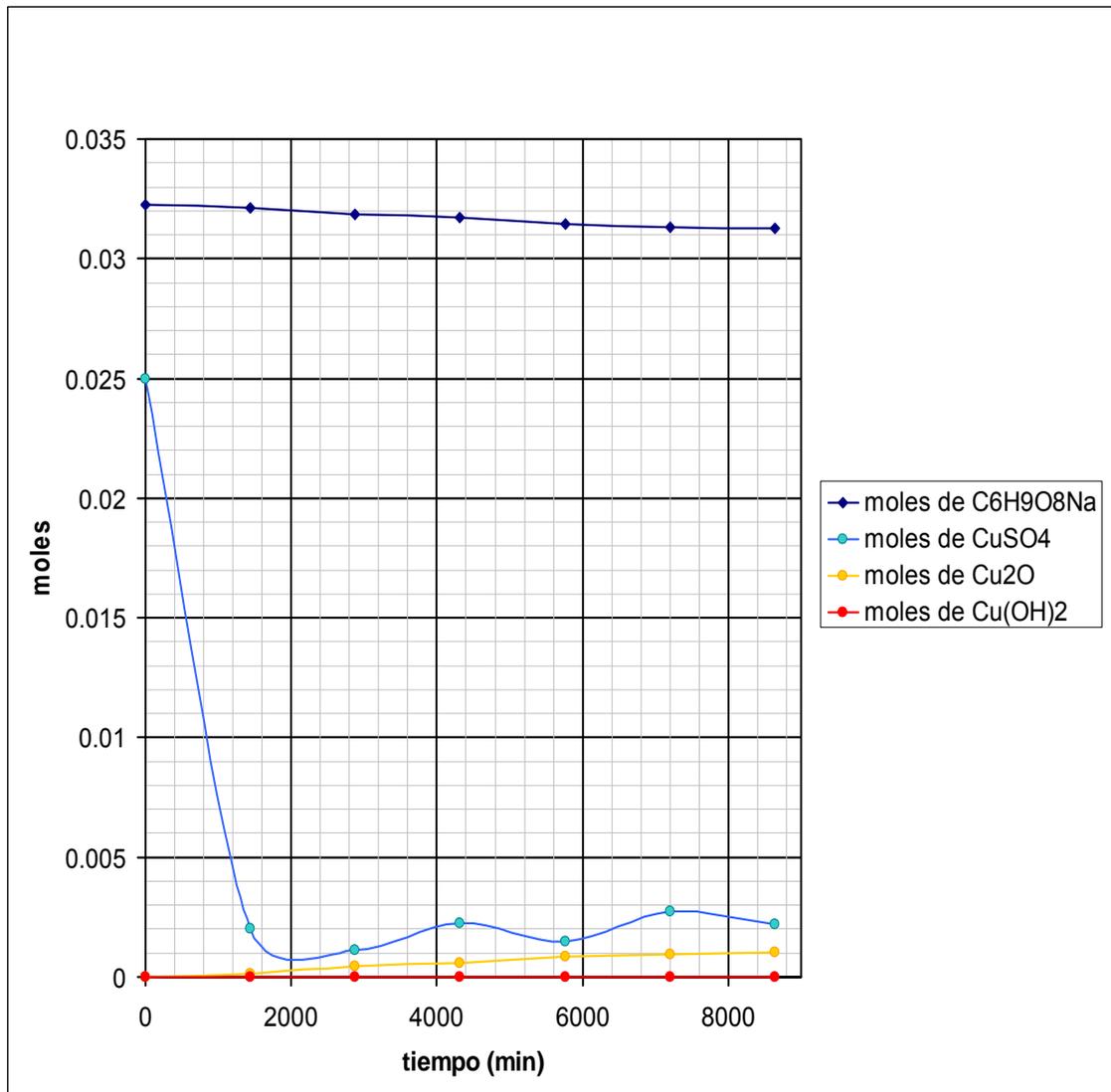
Fuente: Datos calculados, sección anexos.

Figura 12. Relación estequiométrica teórica del equilibrio de la reacción redox del ácido D-Glucárico.



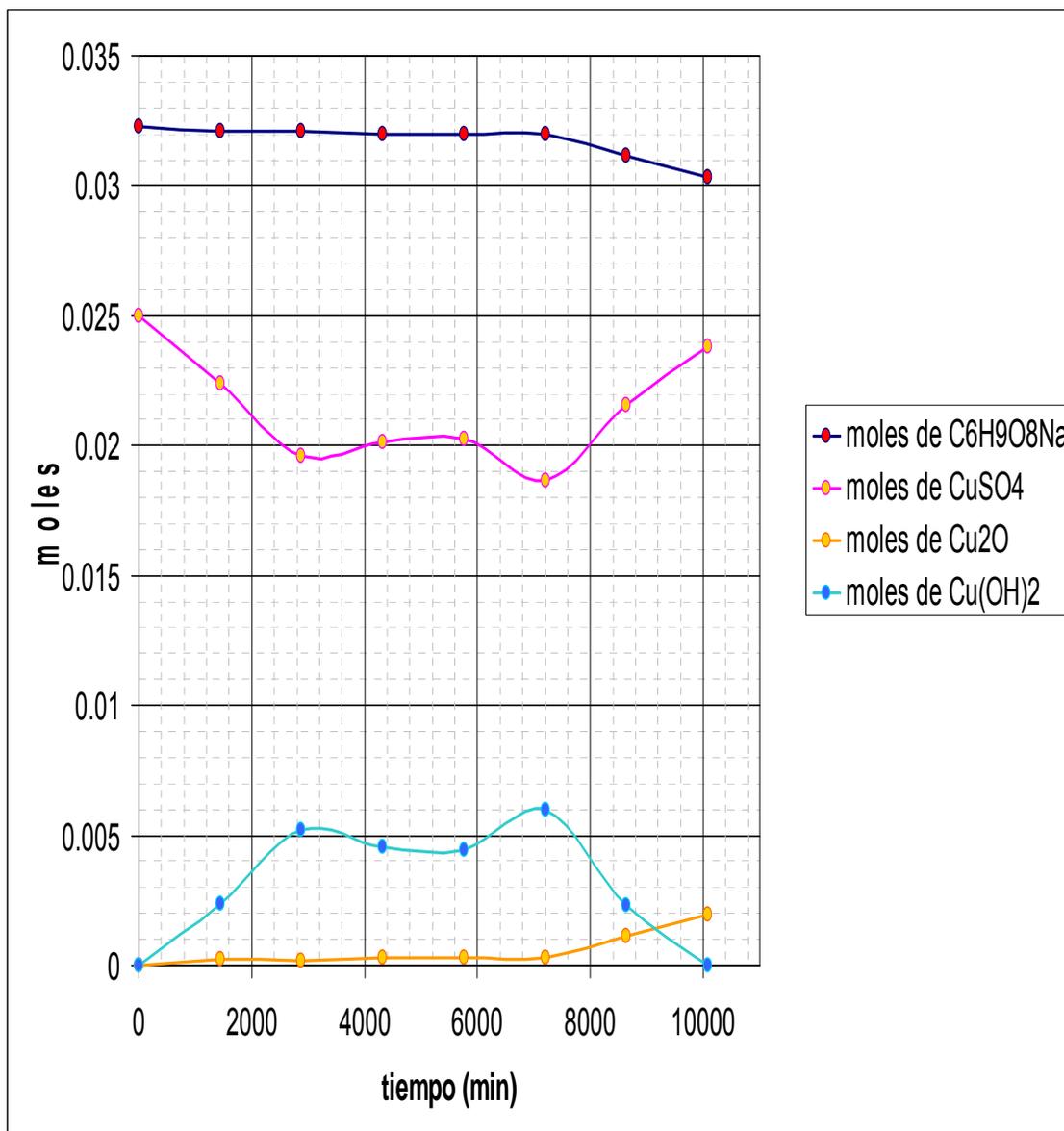
Fuente: Tabla XIV, sección datos calculados.

Figura 13. Cantidades esperadas de las especies participantes en la cinética de la reacción del ácido D-Glucárico, muestra A.



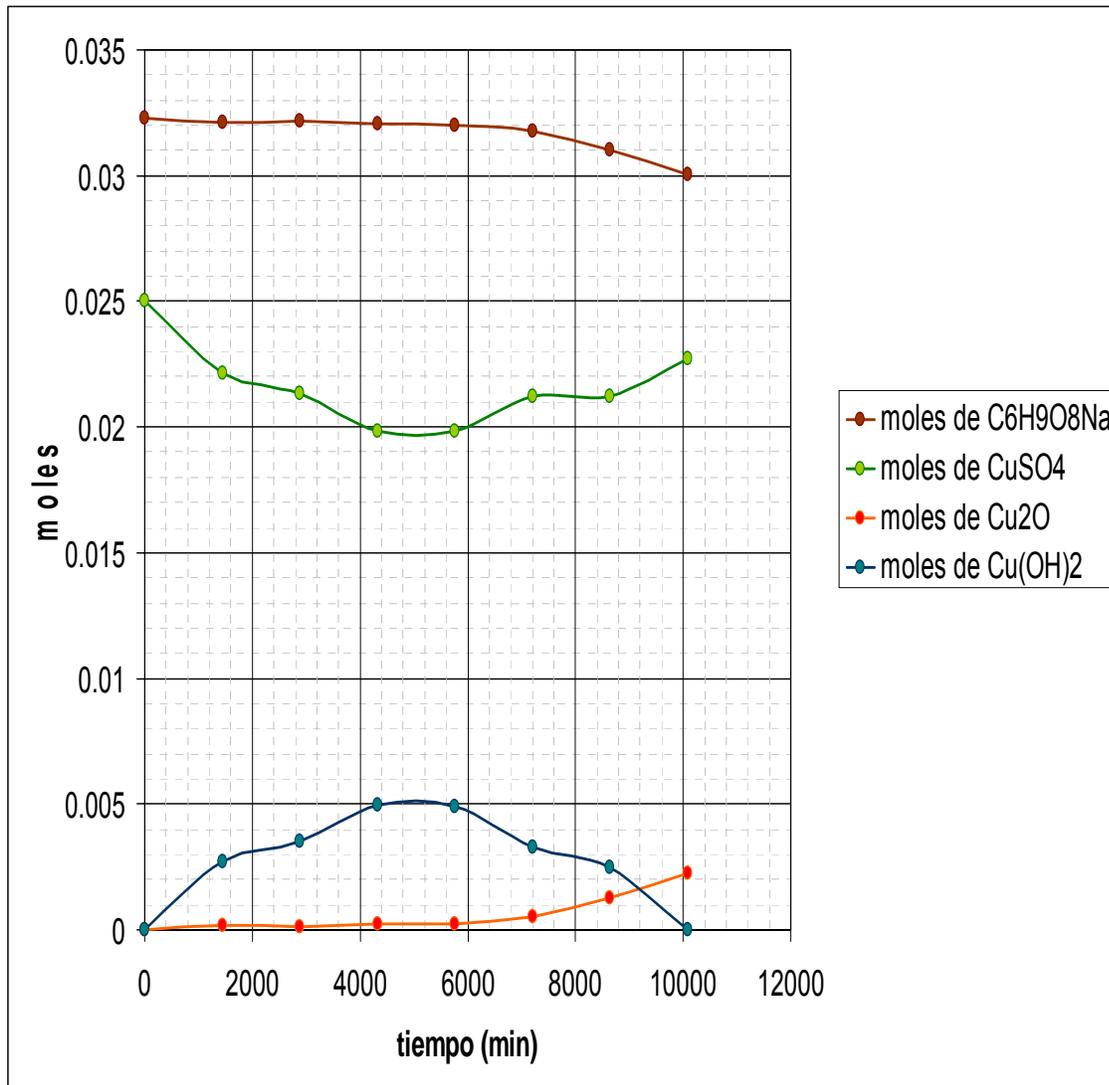
Fuente: Tabla XV, sección datos calculados.

Figura 14. Cantidades esperadas de las especies participantes en la cinética de la reacción del ácido D-Glucárico, muestra B.



Fuente: Tabla XVI, sección datos calculados.

Figura 15. Cantidades esperadas de las especies participantes en la cinética de la reacción del ácido D-Glucárico, muestra C.



Fuente: Tabla XVII, sección datos calculados.

Tabla VII. Cantidades obtenidas experimentalmente de las especies participantes en la cinética de reacción del ácido D-Glucárico, muestra A.

tiempo (min)	moles de $C_6H_9O_8Na$	moles de $CuSO_4$	moles de Cu_2O	moles de $Cu(OH)_2$
0	0.001745	0.025	0	0
1440	0.0010145	0.002	0.0001365	0
2880	0.0009548	0.0011054	0.0001538	0
4320	0.00034256	0.00223886	0.00024723	0
5760	0.00024723	0.0014859	0.00034256	0
7200	0.0001538	0.00275152	0.0009548	0
8640	0.0001365	0.0021867	0.0010145	0
10080	0	0.023255	0.001745	0

Fuente: datos calculados, sección anexos.

Tabla VIII. Cantidades obtenidas experimentalmente de las especies participantes en la cinética de reacción del ácido D-Glucárico, muestra B.

tiempo (min)	moles de $C_6H_9O_8Na$	moles de Cu_2O	moles de $Cu(OH)_2$
0	0.001951406	0	0
1440	0.001132238	0.000209682	0.002378152
2880	0.0003215	0.000156257	0.005238085
4320	0.000307522	0.000314511	0.00454104
5760	0.000314511	0.000307522	0.004459035
7200	0.000156257	0.0003215	0.006006884
8640	0.000209682	0.001132238	0.002326899
10080	0	0.001951406	0

Fuente: datos calculados, sección anexos.

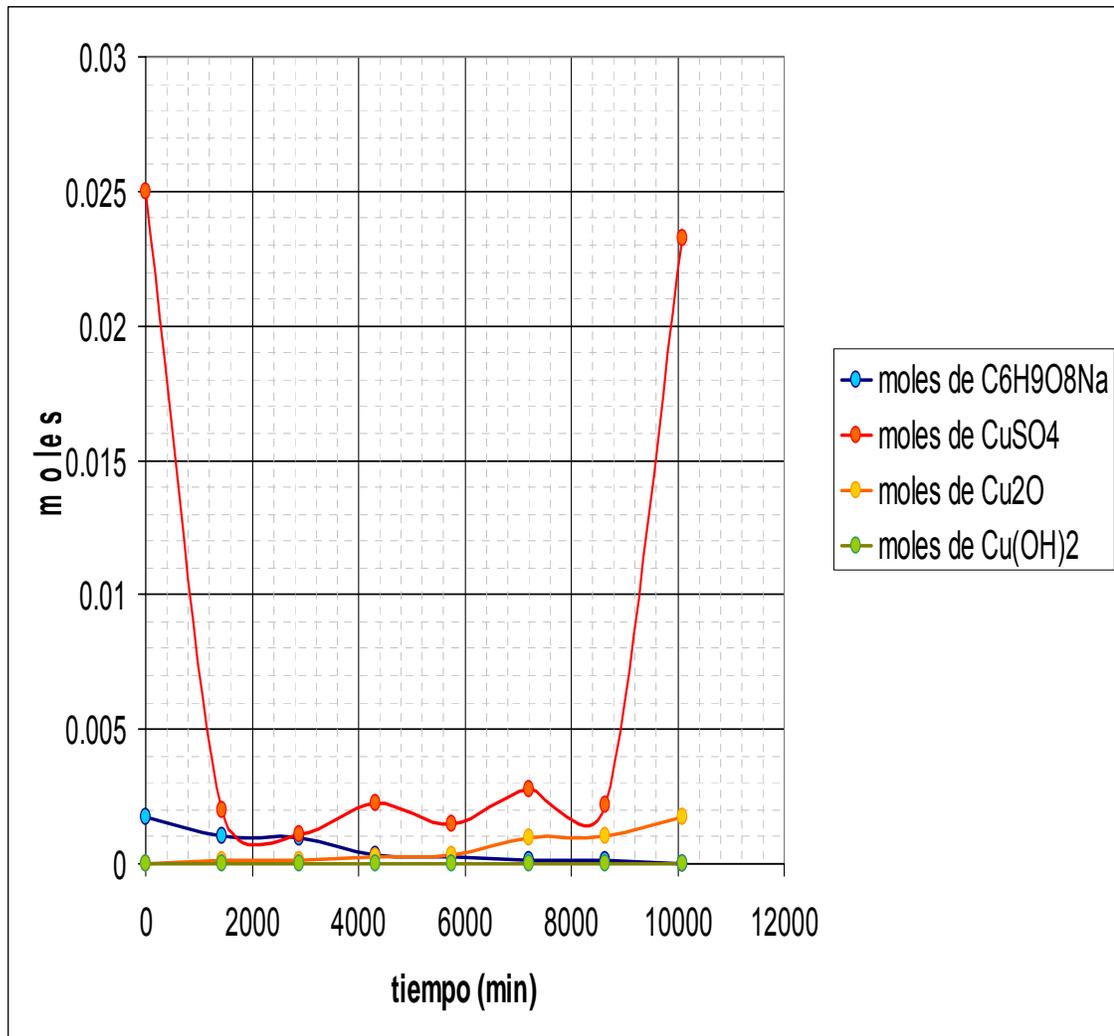
Tabla IX. Cantidades obtenidas experimentalmente de las especies participantes en la cinética de reacción del ácido D-Glucárico, muestra C.

tiempo (min)	moles de $C_6H_9O_8Na$	moles de Cu_2O	moles de $Cu(OH)_2$
0	0.002257488	0	0
1440	0.001285999	0.000174728	0.002685672
2880	0.000517195	0.000132793	0.003515975
4320	0.000258598	0.000216663	0.004971568
5760	0.000216663	0.000258598	0.004910064
7200	0.000132793	0.000517195	0.00329046
8640	0.000174728	0.001285999	0.002490909
10080	0	0.002257488	0

Fuente: Datos calculados, sección anexos.

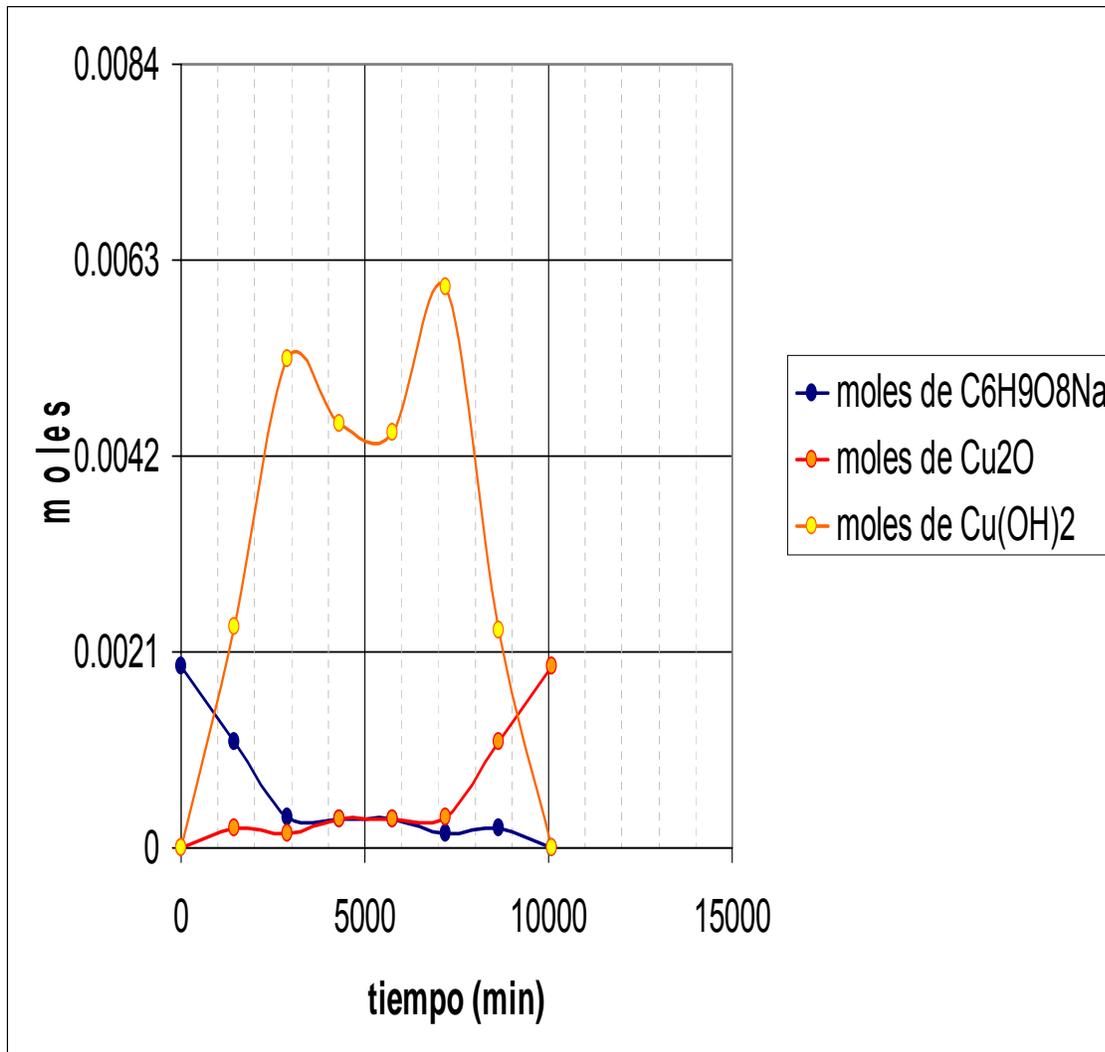
- La cantidad máxima de $C_6H_9O_8Na$ obtenida de las tres muestras es de 0.002257 moles
- El grado de conversión de la reacción es del 7%
- El porcentaje de $C_6H_9O_8Na$ que reaccionó con el reactivo de Fehling es del 27.09%

Figura 16. Cantidades obtenidas experimentalmente de las especies participantes en la cinética de reacción del ácido D-Glucárico, muestra A.



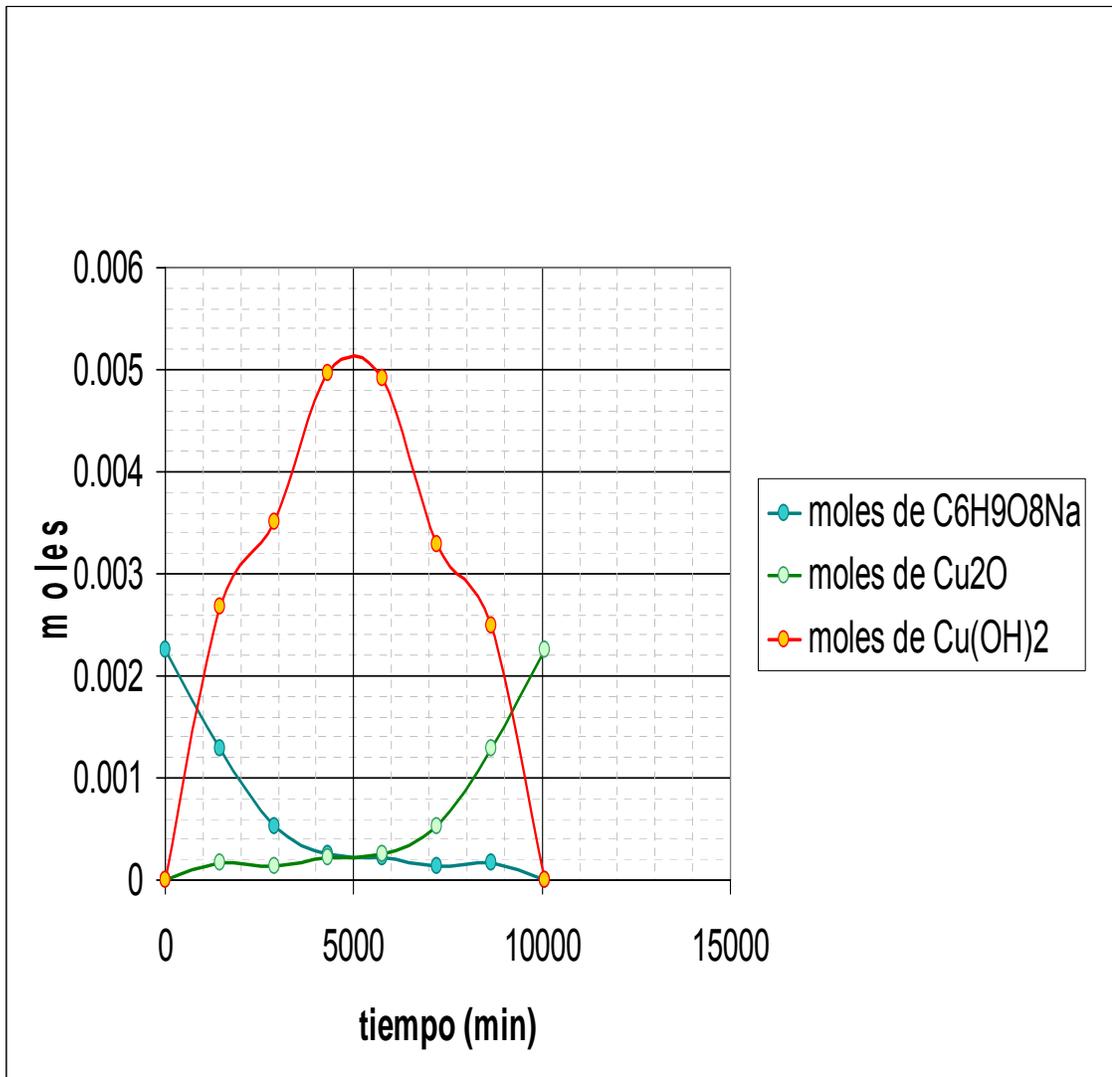
Fuente: Tabla XVIII, sección datos calculados.

Figura 17. Cantidades obtenidas experimentalmente de las especies participantes en la cinética de reacción del ácido D-Glucárico, muestra B.



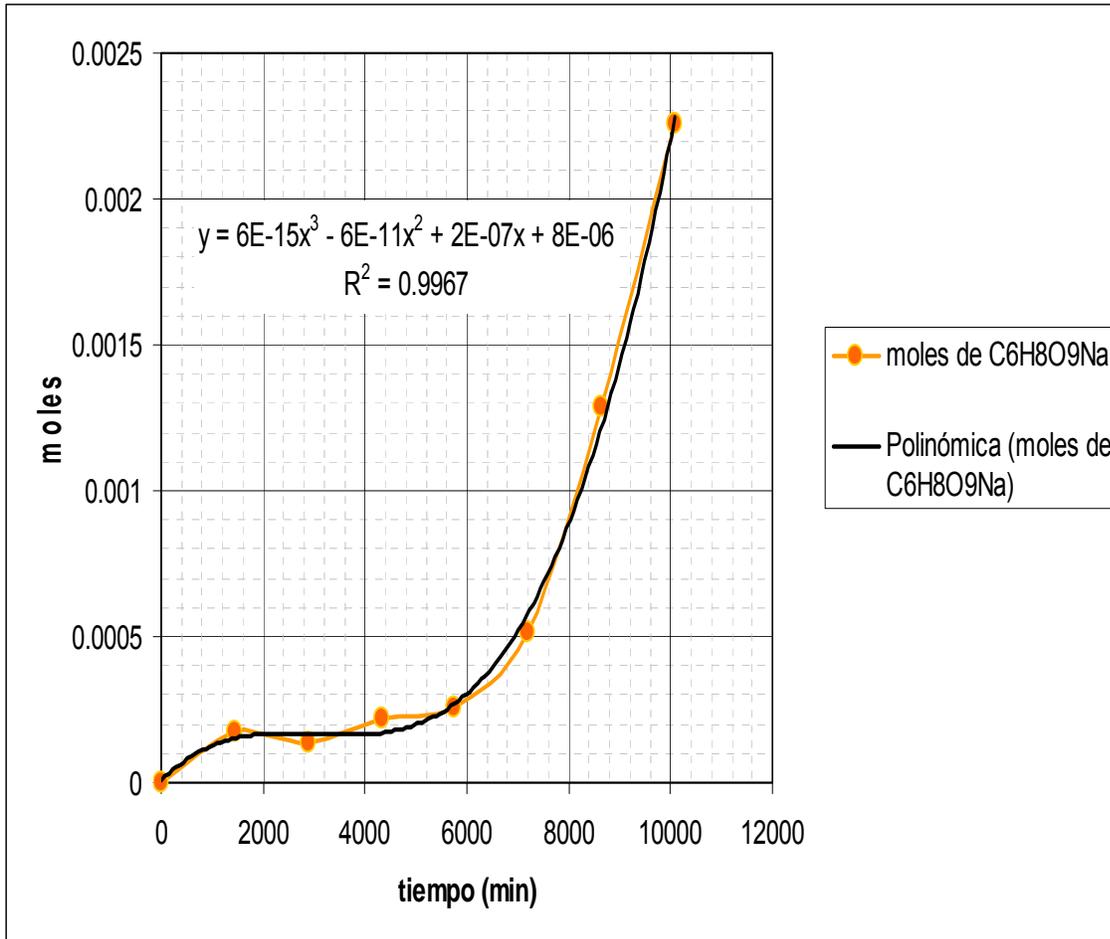
Fuente: Tabla XIX, sección datos calculados.

Figura 18. Cantidades obtenidas experimentalmente de las especies participantes en la cinética de reacción del ácido D-Glucárico, muestra C.



Fuente: Tabla XX, sección datos calculados.

Figura 19. Cinética de la reacción del ácido D-Glucárico.

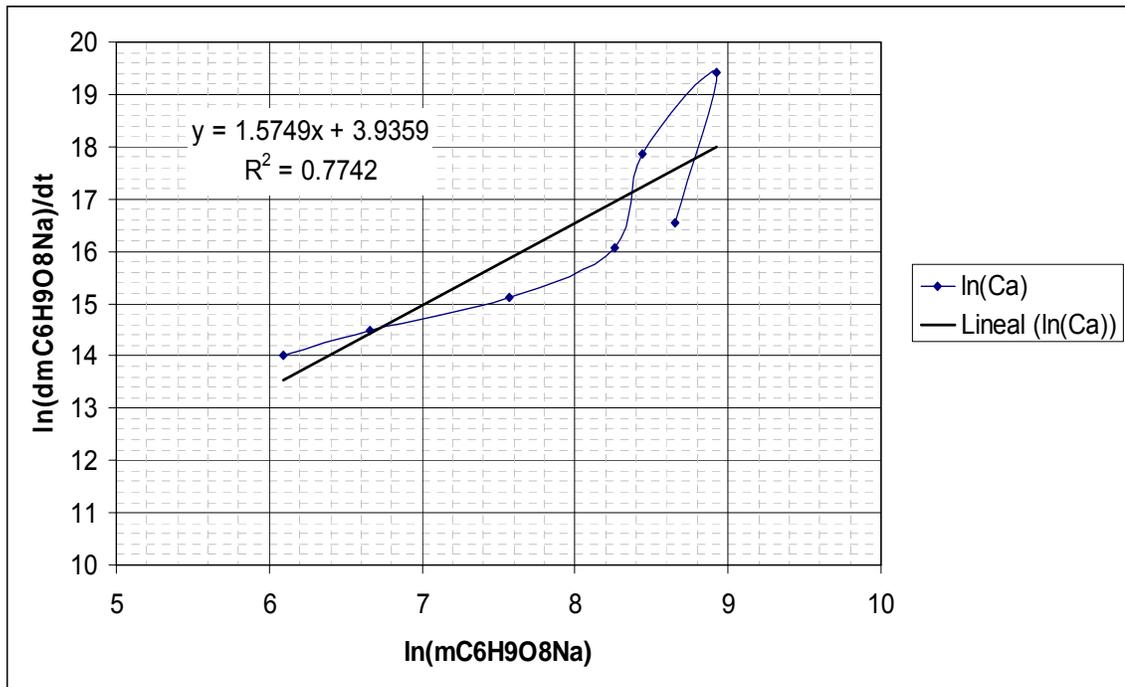


Fuente: Tabla XX, sección datos calculados.

- Modelo matemático obtenido:

$$n_{C_6H_9O_8Na} = 6E-15t^3 - 6E-11t^2 + 2E-07t + 8E-06$$

Figura 20. Primera derivada del ajuste de polinomio para la conversión de la sal sódica del ácido D-Glucárico.



Fuente: Tabla XXI, sección datos calculados.

- Orden de la reacción 1.5749
- Constante de velocidad específica $51.2982 \text{ mol}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$
- Ley de velocidad para la síntesis del ácido D-Glucárico:

$$r_{C_6H_9O_8Na} = 51.2982 \cdot n_{C_6H_9O_8Na}^{1.6}$$

7. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

La propuesta y diseño del experimento se basa en la premisa de que “puede sintetizarse un preservante natural (en este caso las propiedades de preservación las tendría el ácido carboxílico obtenido) a partir de la extracción de la celulosa presente en el culmo del bambú del género *Guadua angustifolia*”; utilizando las propiedades físicas y químicas que poseen los carbohidratos se planteó y diseñó un experimento para obtener la sal sódica del ácido D-Glucárico, a partir de la celulosa, además de obtener el grado de conversión o eficiencia de la reacción, la cinética de la misma y la cantidad teórica y experimental obtenida de la especie principal.

La razón de calcular el porcentaje o la eficiencia de la reacción fue para determinar la factibilidad del método de obtención del preservante, cabe resaltar que el experimento no cuantifica o mide las propiedades de la especie como preservante, si no únicamente plantea una teoría acerca de la conversión de la celulosa y azúcares reductoras en ácidos carboxílicos menores que por sus propiedades físicas pudieran ser capaces de alterar las propiedades organolépticas de las maderas para así evitar el ataque de las plagas.

El planteamiento y diseño del experimento se basó, en primer lugar, en proponer la reacción general balanceada y el mecanismo de reacción para la síntesis del ácido carboxílico. En segundo lugar se propuso la metodología para obtener el preservante por medio de un experimento sencillo, seguidamente se evaluó la cantidad de ácido carboxílico obtenida por medio de pruebas de identificación, basadas en análisis gravimétricos, para obtener así, por medio de la comparación con los datos esperados, la eficiencia de la reacción.

En el gráfico 1 (ver sección de resultados) puede observarse el diagrama de equilibrio de la reacción, estos datos son teóricos y se trabajaron bajo la suposición de que todas las especies reactantes se convierten en sus productos respectivos, como se observa en el punto dos de la curva de equilibrio de la misma gráfica, el ácido nítrico es la única especie que está en exceso, ya que la reacción se lleva a cabo en medio alcalino, es de esperarse que ésta tenga un exceso de hidróxido de sodio. Entonces, debe de existir en la reacción de óxido-reducción la cantidad necesaria de ácido, para oxidar la glucosa y para neutralizar el hidróxido de sodio presente.

Debido a que se realizaron tres corridas, para observar si existe diferencia significativa entre las cantidades obtenidas de ácido D-Glucárico a partir de la misma materia prima, se realizaron diagramas teóricos de las reacciones de las pruebas de identificación del ácido con el reactivo de Fehling, para la muestra A (gráfico 2, sección de resultados) se observó que existe el apareamiento de un precipitado azul (sulfato de cobre) que coexiste con el precipitado de marrón de óxido cuproso, se supone que, debido al apareamiento del precipitado azul de sulfato de cobre, éste no reaccionó con todo el gluconato de sodio presente en la mezcla (0.03228 moles teóricos), es por eso que debería de existir un residuo de esta sal en la solución final (ver tabla IV, sección de resultados), estos datos no concuerdan con los obtenidos experimentalmente, ya que al obtener sólo 0.001745 moles de óxido cuproso, agregando el reactivo de Fehling en exceso, se asume que en la muestra existía únicamente la misma proporción de ácido glucárico, (ver tabla VII, sección de resultados), el diagrama muestra que el porcentaje de conversión con respecto al tiempo es bajo (ver gráfico 5, sección resultados). La aparición del precipitado de sulfato de cobre al inicio de la reacción se debe a que los productos son especies de pH alcalino, el nitrito de sodio de pH= 9, el ácido D-Glucárico, sal sódica pH = 7.5 – 8.5.

Para la muestra B se observó que la conversión de gluconato de sodio a la sal sódica del ácido D-Glucárico fue mayor que el de la muestra A, obteniendo la mayor conversión de 0.001951 moles de la sal sódica del ácido D-Glucárico. En el gráfico 3 (ver sección de resultados) se observa que debería existir un residuo de gluconato de sodio, para la cantidad obtenida del ácido, pero en el gráfico 6 se observa que de la conversión de la celulosa únicamente se obtuvo 0.001951 moles de la sal sódica ácido D-Glucárico, por lo que aquí también se observa un grado de conversión mínimo que alcanza el 6%.

Para la muestra C se observó la mayor conversión de las tres muestras alcanzando un máximo de 0.002257 moles de la sal sódica del ácido D-Glucárico, el diagrama de la cinética de reacción teórico (gráfico 4, sección de resultados) muestra un remanente del ácido que no reacciona con el reactivo de Fehling, debido a las condiciones del sistema. Experimentalmente se cuantifica que en la última corrida de la muestra C, sólo existe la presencia de óxido cuproso (ver tabla 9, sección resultados) por lo que el grado de conversión es de 7%, este es el grado de conversión máximo para todas las corridas realizadas.

De aquí se concluye que el porcentaje de rendimiento de la reacción de conversión de la celulosa a la sal sódica del ácido D-Glucárico es muy bajo, esto debido a que, en primer lugar, no se dio una hidrólisis completa de la celulosa, y parte de la cadena de ésta no se pudo romper para obtener así el gluconato de sodio, además la poca reactividad de la celulosa con las especies reactante, dio como resultado la baja obtención de ácido D-Glucárico; ya que el mecanismo de reacción se va por medio de una E_2 ; ésta pudo entrar en competencia con una sustitución y así formar otras especies que no se pueden apreciar en las pruebas de identificación realizadas a las muestras, esto implica

que a pesar de que se puede obtener la sal del ácido D-Glucárico, la cantidad obtenida de éste es mínima.

La eficiencia del método en este caso es muy pequeña (del 7%), y aunque la materia prima utilizada es un desperdicio de otros procesos, y los reactivos utilizados son accesibles y poco costosos, es conveniente evaluar la factibilidad de la obtención del ácido con respecto a los costos en los que se incurre para la síntesis del mismo.

Se estableció la cinética de reacción de la formación de ácido D-Glucárico para determinar la ley de velocidad de la reacción, por simple inspección se puede determinar que es necesario un período de 10080 minutos para que se de la conversión máxima de la reacción.

Para determinar la ecuación de velocidad de reacción se utilizó el método de ajuste de polinomios en el cual se ajusta un polinomio de grado n a la curva moles vrs. Tiempo el cual al obtener su primera derivada y linealizar la curva se obtiene la ley de velocidad de reacción. Para éste caso se determinó que el orden de la reacción es de 1.5749 y la constante cinética es de 51.2982, de lo cual se concluye que la reacción se da en dos pasos y aunque la constante indica que la reacción tiende hacia los productos, esta se demora en llegar al equilibrio, además se observa que la reacción tiende a reversibilidad ya que al medir el pH a las tres soluciones después de un período de tiempo prolongado este era de 12, por lo que se puede concluir que el incremento de pH se debe a la regeneración del hidróxido de sodio.

Al observar el análisis estadístico realizado al experimento se observa (ver tabla XXII, sección anexos) que el coeficiente de variación promedio es de 20.31% y el valor máximo tolerable es del 10% por lo que existe una diferencia

significativa entre las cantidades obtenidas entre cada muestra obtenida, esto indica que no se obtuvo cantidades equivalentes de producto en cada una de las muestras tratadas.

Para minimizar la diferencia entre las cantidades obtenidas de cada muestra, debe realizarse la síntesis del ácido D-Glucárico en un reactor CSTR y debe tenerse cuidado de que las concentraciones de las mezclas sean constantes.

Se observó que el valor de la t de Student calculada difiere de la teórica en un 98%, tal diferencia se debe a que, en primer lugar, como se planteó anteriormente, el grado de conversión de la reacción es muy bajo por lo que existe una diferencia significativa entre los datos obtenidos.

CONCLUSIONES

1. Se obtuvo la sal sódica del ácido D-Glucárico a través de la conversión de la celulosa extraída del culmo del bambú, *Guadua angustifolia*.
2. El máximo grado de conversión de la reacción de la síntesis de la sal sódica del ácido D-Glucárico es del 7%.
3. Se obtuvo la sal sódica del ácido D-Glucárico por medio de una reacción de óxido-reducción, comprobando que la reacción de Cannizzaro se aplica para este método.
4. Se estableció que el orden de reacción es del 1.5749 y la constante cinética de reacción es de $51.2982 \text{ mol}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$.
5. Se determinó que la reducción de los carbohidratos presentes en la muestra fue de un 27%.
6. El método es poco eficiente para obtener la sal sódica del ácido D-Glucárico, a partir de la reducción de la celulosa presente en la *Guadua angustifolia*.

RECOMENDACIONES

1. Para evitar una diferencia significativa entre las cantidades molares presentes en cada una de las muestras, se debe mantener éstas en agitación constante.
2. Para evitar la precipitación del sulfato de cobre en la prueba de identificación, la mezcla a analizar debe tener un pH neutro.
3. Debe tenerse cuidado de que al momento de la reacción redox el único reactivo que debe estar en exceso es el ácido nítrico.
4. Manejar la eficiencia de conversión a azúcares ácidos de los xantatos comparándolos con un patrón de goma xantan pura.
5. Deben de estudiarse las propiedades de la sal sódica del ácido D-Glucárico como preservante para maderas, además del estudio económico que debe realizarse para conocer la factibilidad del método.

BIBLIOGRAFÍA

1. Frederick G. Bordwell. **Organic Chemistry** (Tercera edición; Canada: Editorial Collier-Macmillan, 1964) pp. 664-704.
2. Herbert Meislich. **Química Orgánica** (Colombia: Editorial Mc Graww-Hill Latinoamericana S.A., 1977) pp. 256, 432.
3. Pablo N. Solis y otros. **Manual de caracterización y Análisis de Drogas Vegetales y Productos Fitoterapeuticos** (Proyecto Desarrollo de Tecnología de Cultivo de Plantas Medicinales y Producción de Fitoterapicos OEI/AICD/AE 089/03) pp. 44-45.
4. Browning B. L. **Methods of Wood Chemistry** (New York: Interscience Publishers. A Division of John Welley & Sons. 1967) p. 384.
5. Gonzalo Vélez Jhan. **El humilde bambú-Acero vegetal-** (Caracas, Venezuela: 2CVA- Segundo Congreso Virtual de Arquitectura. 2001).
6. Normas ASTM, **Standard Method of Testing word Preservatives by Laboratory Soilblocks Cultures.** (Revisión 1986) Norma D 1413-76, D 3345-74, D 3507-86. pp. 235-241; 432-434; 450-454.
7. Wingrove Allan S. **Química Orgánica** (México: Oxford University Press) pp. 1440 – 1476.
8. Lee-Van Orden. **Química General** (segunda edición; México: Editorial Interamericana, 1968) pp. 670-677.

9. Fogler, Scott. **Elementos de Ingeniería Química de las Reacciones Químicas.** (Tercera edición; México: Editorial Pearson Education, 2001) pp. 223-261.

10. Levine, Ira N. **Fisicoquímica.** (Cuarta Edición; España: Editorial McGraw-Hill, 1996) pp. 564-574.

ANEXOS

Muestra de cálculo

Se utilizaran 10 g de muestra de astillas de bambú, la composición de la muestra en gramos es la siguiente:

Tabla X. Proporción de los componentes activos en la muestra.

Componentes	% en la muestra	Cantidad en gramos
Extractivos agua caliente	5.33	0.533 g
Extractivos A-B	4.04	0.404 g
Azucares reductoras	1.01	0.101 g
Celulosa	52.34	5.234 g
Lignina	22.14	2.214 g

Extracción de celulosa:

$(0.5234) \cdot 10 \text{ g} = 5.234 \text{ g}$ de celulosa que se pueden extraer.

Extracción de lignina:

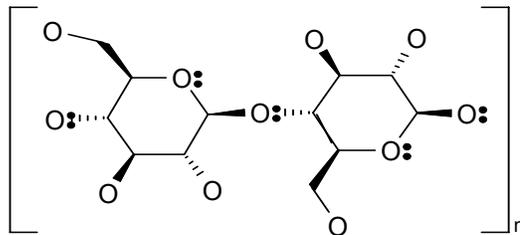
$(0.2214) \cdot 10 \text{ g} = 2.214 \text{ g}$ de lignina que se puede extraer.

Extracción de otros componentes;

$10 \text{ g} - (5.234 + 2.214) \text{ g} = 2.552 \text{ g}$ de otros componentes.

Porcentaje teórico de conversión.

Si los grupos funcionales de la celulosa son:



Entonces puede tomarse el peso relativo de la celulosa en función de “n” monómeros:

$(C_6H_{10}O_5)_n$ El peso molecular es:

$$\text{P.M. C: } 6 \cdot 12.0107 \text{ g/mol} = 72.0642 \text{ g/mol}$$

$$\text{H: } 10 \cdot 1.00794 \text{ g/mol} = 10.0794 \text{ g/mol}$$

$$\text{O: } 5 \cdot 15.9994 \text{ g/mol} = \underline{79.997 \text{ g/mol} +}$$

$$162.14082 \text{ g/mol}$$

Entonces el peso molecular especular es $n \cdot (162.14082) \text{ g/mol}$

De aquí se puede obtener la relación estequiométrica de la siguiente manera:

$$5.234 \text{ g } (C_6H_{10}O_5)_n \cdot \frac{1 \text{ mol de } (C_6H_{10}O_5)_n}{(162.14082)_n (C_6H_{10}O_5)_n \text{ g}}$$

Como en la reacción, uno de los hidrógenos es sustituido por un ion de sodio:

$(C_6H_{10}O_5Na)_n$ El peso es:

$$\begin{array}{r}
 \text{P.M.} \quad C: 6 \cdot 12.0107 \text{ g/mol} = 72.0642 \text{ g/mol} \\
 \quad \quad H: 10 \cdot 1.00794 \text{ g/mol} = 7.05558 \text{ g/mol} \\
 \quad \quad O: 5 \cdot 15.9994 \text{ g/mol} = 79.997 \text{ g/mol} \\
 \quad \quad Na: 22.98977 \text{ g/mol} = 22.98977 \text{ g/mol} + \\
 \hline
 \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad 182.10435 \text{ g/mol}
 \end{array}$$

El peso molecular es $(182.10435)_n$ g/mol

Entonces:

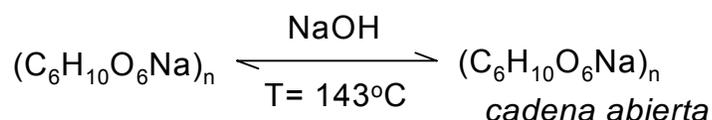
$$5.234 \text{ g } (C_6H_{10}O_5)_n \cdot \frac{1 \text{ mol de } (C_6H_{10}O_5)_n}{(162.14082)_n (C_6H_{10}O_5)_n \text{ g}} \cdot \frac{1 \text{ mol de } (C_6H_9O_5Na)_n}{1 \text{ mol de } (C_6H_9O_5)_n}$$

$$\frac{182.10435 \text{ g de } (C_6H_9O_5Na)_n}{1 \text{ mol de } (C_6H_9O_5Na)_n} = 5.8785 \text{ g de } (C_6H_{10}O_6Na)_n$$

$$5.8785 \text{ g de } (C_6H_{10}O_6Na)_n = \frac{1 \text{ mol de } (C_6H_9O_5Na)_n}{182.10435 \text{ g } (C_6H_9O_5Na)_n} \cdot \frac{1 \text{ mol } (C_6H_{10}O_6Na)_n}{1 \text{ mol de } (C_6H_9O_5Na)_n}$$

$$\frac{* 201.12977 \text{ g } (C_6H_{10}O_6Na)_n}{1 \text{ mol de } (C_6H_{10}O_6Na)_n} = 6.492580 \text{ g } (C_6H_{10}O_6Na)_n$$

El siguiente paso de la reacción es:

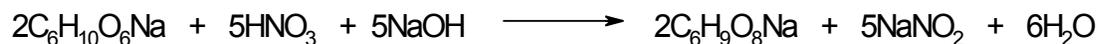


En el cual la especie formada pasa de forma cíclica a cadena abierta, por lo tanto la relación estequiométrica es 1:1 y no existe cambio químico, entonces se obtiene:

$$6.492580 \text{ g de } (\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_6\text{Na})_n = \frac{1 \text{ mol de } (\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_6\text{Na})_n}{201.12977 \text{ g de } (\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_6\text{Na})_n} *$$

$$\frac{201.12977 \text{ g de } (\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_6\text{Na})_n}{1 \text{ mol de } (\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_6\text{Na})_n} = 6.49258 \text{ g de } (\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_6\text{Na})_n \text{ de cadena abierta}$$

Para obtener la sal sódica del ácido D-Glucárico se obtiene la relación estequiométrica de la siguiente reacción:

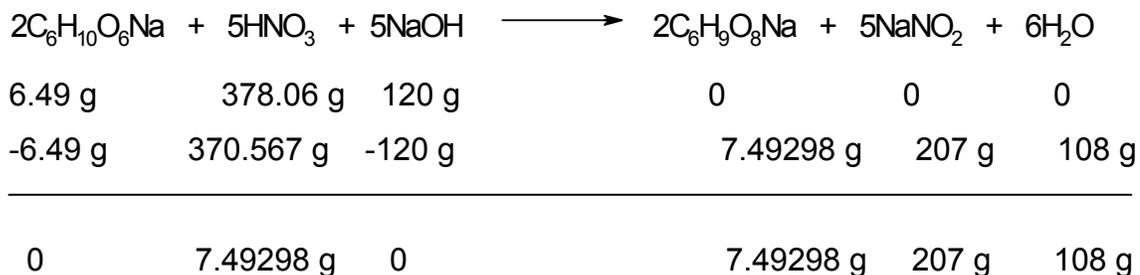


La relación estequiométrica es entonces 2:2

$$6.49258 \text{ g } (\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_6\text{Na})_n = \frac{1 \text{ mol de } (\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_6\text{Na})_n}{201.12977 \text{ g de } (\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_6\text{Na})_n} * \frac{2 \text{ mol } (\text{C}_6\text{H}_9\text{O}_8\text{Na})}{2 \text{ mol } (\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_6\text{Na})_n}$$

$$* \frac{232.12063 \text{ g } \text{C}_6\text{H}_9\text{O}_8\text{Na}}{1 \text{ mol } (\text{C}_6\text{H}_9\text{O}_8\text{Na})_n} = 7.492989 \text{ g } (\text{C}_6\text{H}_9\text{O}_8\text{Na})_n$$

Se obtienen 7.492989 g (C₆H₉O₈Na)_n, ahora para obtener las cantidades molares de las especies al equilibrio:



Ahora para la prueba de identificación se utilizan 0.025 moles de CuSO₄ de los cuales se asume que todos reaccionan para formar óxido cuproso, entonces:

$$0.025 \text{ moles CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O} = \frac{1 \text{ mol CuO}}{3 \text{ mol CuSO}_4} * \frac{143.0794 \text{ g Cu}_2\text{O}}{1 \text{ mol Cu}_2\text{O}} = 1.1923 \text{ g Cu}_2\text{O}$$

Se obtienen 1.1923 g de Cu₂O teóricos.

Para encontrar la cantidad obtenida de óxido cuproso se utiliza la siguiente relación:

$$\text{Tara de papel filtro y muestra} - \text{Tara de papel filtro} = \text{peso de muestra}$$

De donde se obtiene:

$$2.163 \text{ g} - 1.84 \text{ g} = 0.323 \text{ g de Cu}_2\text{O}$$

El porcentaje de conversión de los carbohidratos es:

$$\% \text{ conversión} = \frac{\text{dato experimental}}{\text{Dato teórico}} * 100\%$$

$$(0.323 \text{ g} / 1.1923 \text{ g}) * 100\% = 27.09\%$$

Para determinar la ecuación de la velocidad de la reacción se utilizó el método de ajuste de polinomio, el polinomio que mejor se ajusta a los datos obtenidos de la tabla XVI es un polinomio de grado 3, el cual es:

$$n_{\text{C}_6\text{H}_9\text{O}_8\text{Na}} = 6\text{E-}15t^3 - 6\text{E-}11t^2 + 2\text{E-}07t + 8\text{E-}06$$

Obteniendo la primera derivada del polinomio:

$$\frac{d(n)}{dt} = 1.2\text{E-}14 * t^2 - 1.2\text{E-}10 * t + 2\text{E-}7$$

Y graficando $\ln\left(\frac{d(n)}{dt}\right)$ vs $\ln(d(n))$ para linealizar la curva, se obtiene

la ecuación de velocidad de la siguiente forma:

$$\ln\left(\frac{d(n_A)}{dt}\right) = \ln(k_A) + \alpha \ln(n_A)$$

La cual es:

$$\ln\left(\frac{d(n_A)}{dt}\right) = 1.5749 * \ln(n_A) + 3.9359$$

De donde:

$$\alpha = 1.5749$$

$$k_A = 51.2082 \text{ mol}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$$

La ecuación de velocidad se presenta de la siguiente forma:

$$r_{n_A} = 51.2082 * n_A^{1.6}$$

Con lo cual queda establecida la ecuación de velocidad para la síntesis de la sal sódica del ácido D-Glucárico.

Datos originales

Tabla XI. Pesos de papel filtro y papel filtro y muestras, temperatura y pH de las soluciones.

Muestra	corrida	Tara papel filtro (g)	Tara muestra + papel filtro (g)	Temperatura (°C)	pH
A	1	1.828	2.178	21	7.25
	2	1.832	2.108		7.7
	3	1.803	2.362		8.1
	4	1.824	2.195		8.34
	5	1.846	2.427		8.5
	6	1.823	2.308		9
	7	1.817	2.254		9.23
B	1	1.821	2.083	21.4	7.34
	2	1.837	2.37		7.45
	3	1.825	2.313		7.65
	4	1.838	2.317		8
	5	1.795	2.533		8.21
	6	1.846	2.008		8.6
	7	1.81	1.981		8.79
C	1	1.823	2.11	21.4	7.1
	2	1.834	2.196		7.25
	3	1.809	2.325		7.34
	4	1.787	2.301		7.45
	5	1.823	2.219		7.89
	6	1.817	2.244		8.03
	7	1.84	2.163		8.45

Tabla XII. Densidades de las soluciones utilizadas en el experimento.

Muestra	Concentración	densidad (g/cm ³)	Temperatura (°C)	pH
A		1.3008	21	12.04
B		1.2881	21.4	12
C		1.2787	21.4	12.21
Fehling	0.1 N	1.0051	21.6	
NaOH	50%	1.2694	26	13.88
HNO ₃	65%	1.41	20	0.56

Datos Calculados

Tabla XIII. Cantidades de las especies involucradas en la reacción.

		Cantidad de las especies presentes en la muestra		
Muestra	corrida	Cu ₂ O (g)	CuSO ₄ (g)	Cu(OH) ₂ (g)
A	1	0.0195303	6.242	0
	2	0.0220056	0.49936	0
	3	0.0353735	0.275996272	0
	4	0.0490133	0.558998565	0
	5	0.1366122	0.370999512	0
	6	0.1451541	0.686999514	0
	7	0.2496736	0.545975256	0
B	1	0.0300011	6.242	0
	2	0.0223571	5.595853128	0.232
	3	0.045	4.895140827	0.511000001
	4	0.044	5.029666045	0.443
	5	0.046	5.051886159	0.435
	6	0.162	4.661929148	0.586
	7	0.279206	5.378322627	0.227
C	1	0.025	6.242	0
	2	0.019	5.527815375	0.262
	3	0.031	5.330975575	0.343
	4	0.037	4.946602565	0.485
	5	0.074	4.951488597	0.479
	6	0.184	5.291304535	0.321
	7	0.323	5.298981498	0.243

Tabla XIV. Relación estequiométrica teórica del equilibrio de la reacción redox del ácido D-Glucárico.

	Reactivos			Productos		
	moles de $C_6H_{10}O_6Na$	moles de HNO_3	moles de $NaOH$	moles de $C_6H_9O_8Na$	moles de $NaNO_2$	moles de H_2O
Inicio	0.032280552	6	5	0	0	0
Equilibrio	0	0.88	0	0.032280543	5	6

Fuente: Sección Muestra de cálculo.

Tabla XV. Cantidades esperadas de las especies participantes en la cinética de la reacción del ácido D-Glucárico, muestra A.

tiempo (min)	moles de $C_6H_9O_8Na$	moles de $CuSO_4$	moles de Cu_2O	moles de $Cu(OH)_2$
0	0.0010145	0.025	0	0
1440	0.0009548	0.002	0.0001365	0
2880	0.0008456	0.0011054	0.0004398	0
4320	0.0005623	0.00223886	0.0005623	0
5760	0.0004398	0.0014859	0.0008456	0
7200	0.0001365	0.00275152	0.0009548	0
8640	0	0.0021867	0.0010145	0

Fuente: Sección muestra de cálculo.

Tabla XVI. Cantidades esperadas de las especies participantes en la cinética de la reacción del ácido D-Glucárico, muestra B.

tiempo (min)	moles de $C_6H_9O_8Na$	moles de $CuSO_4$	moles de Cu_2O	moles de $Cu(OH)_2$
0	0.03228	0.025	0	0
1440	0.032070318	0.0224121	0.000209682	0.002378152
2880	0.032123743	0.019605659	0.000156257	0.005238085
4320	0.031965489	0.020144449	0.000314511	0.00454104
5760	0.031972478	0.020233443	0.000307522	0.004459035
7200	0.0319585	0.018671616	0.0003215	0.006006884
8640	0.031147762	0.021540863	0.001132238	0.002326899
10080	0.030328594	0.023804859	0.001951406	0

Fuente: Sección muestra de cálculo.

Tabla XVII. Cantidades esperadas de las especies participantes en la cinética de la reacción del ácido D-Glucárico, muestra C.

tiempo (min)	moles de $C_6H_9O_8Na$	moles de $CuSO_4$	moles de Cu_2O	moles de $Cu(OH)_2$
0	0.03228	0.025	0	0
1440	0.032105272	0.0221396	0.000174728	0.002685672
2880	0.032147207	0.021351232	0.000132793	0.003515975
4320	0.032063337	0.019811769	0.000216663	0.004971568
5760	0.032021402	0.019831338	0.000258598	0.004910064
7200	0.031762805	0.021192344	0.000517195	0.00329046
8640	0.030994001	0.021223092	0.001285999	0.002490909
10080	0.030022512	0.022742512	0.002257488	0

Fuente: Sección muestra de cálculo.

Tabla XVIII. Cantidades obtenidas experimentalmente de las especies participantes en la cinética de reacción del ácido D-Glucárico, muestra A.

tiempo (min)	moles de $C_6H_9O_8Na$	moles de $CuSO_4$	moles de Cu_2O	moles de $Cu(OH)_2$
0	0.001745	0.025	0	0
1440	0.0010145	0.002	0.0001365	0
2880	0.0009548	0.0011054	0.0001538	0
4320	0.00034256	0.00223886	0.00024723	0
5760	0.00024723	0.0014859	0.00034256	0
7200	0.0001538	0.00275152	0.0009548	0
8640	0.0001365	0.0021867	0.0010145	0
10080	0	0.023255	0.001745	0

Fuente: Sección muestra de cálculo.

Tabla XIX. Cantidades obtenidas experimentalmente de las especies participantes en la cinética de reacción del ácido D-Glucárico, muestra B.

tiempo (min)	moles de $C_6H_9O_8Na$	moles de Cu_2O	moles de $Cu(OH)_2$
0	0.001951406	0	0
1440	0.001132238	0.000209682	0.002378152
2880	0.0003215	0.000156257	0.005238085
4320	0.000307522	0.000314511	0.00454104
5760	0.000314511	0.000307522	0.004459035
7200	0.000156257	0.0003215	0.006006884
8640	0.000209682	0.001132238	0.002326899
10080	0	0.001951406	0

Fuente: Sección muestra de cálculo.

Tabla XX. Cantidades obtenidas experimentalmente de las especies participantes en la cinética de reacción del ácido D-Glucárico, muestra C.

tiempo (min)	moles de $C_6H_9O_8Na$	moles de Cu_2O	moles de $Cu(OH)_2$
0	0.002257488	0	0
1440	0.001285999	0.000174728	0.002685672
2880	0.000517195	0.000132793	0.003515975
4320	0.000258598	0.000216663	0.004971568
5760	0.000216663	0.000258598	0.004910064
7200	0.000132793	0.000517195	0.00329046
8640	0.000174728	0.001285999	0.002490909
10080	0	0.002257488	0

Fuente: Sección Muestra de cálculo.

Tabla XXI. Linealización del polinomio para obtener la ecuación de la velocidad.

$\ln(dn_a/dt)$	$\ln(n_a)$
16.556213	8.6522801
19.415149	8.926719
17.859752	8.4371674
16.059827	8.2602358
15.128108	7.5670906
14.494972	6.6562194
14.014791	6.0935026

Fuente: Sección muestra de cálculo.

Tabla XXII. Datos del análisis estadístico del experimento.

	C	O	R	R	I	D	A	
Muestra	1	2	3	4	5	6	7	8
A	0	0.00014	0.0002	0.0002	0.0003	0.001	0.00101	0.002
B	0	0.00021	0.0002	0.0003	0.0003	0.0003	0.00113	0.002
C	0	0.00017	0.0001	0.0002	0.0003	0.0005	0.00129	0.002
Promedio	NV	0.00017	0.0001	0.0003	0.0003	0.0006	0.00114	0.002
Desviación	NV	3.7E-05	1E-05	5E-05	4E-05	0.0003	0.00014	3E-04
CV	NV	21.0803	8.7361	19.293	13.923	54.239	11.8984	12.99
							20.3089	CV promedio

Tabla XXIII. Valores de la t de student para el experimento.

Corrida	1	2	3	4	5	6	7	Promedio	t teórica	% de error
A	0.585 8	- 0.2768	0.14 1	- 0.543	- 0.636	0.55	0.53 7	0.051	2.92	98.2475 8
B	- 0.569	- 0.3868	- 0.63 5	- 0.063	0.492	0.05 1	0.07 4	-0.148	2.92	105.069 6
C	- 0.017	0.6636 4	0.49 4	0.606 4	0.143 6	-0.6	- 0.61 1	0.097	2.92	96.6827 9

Diagramas de equipos utilizados en la experimentación

Figura 21. Equipo de reflujo para extracción y reducción de celulosa.

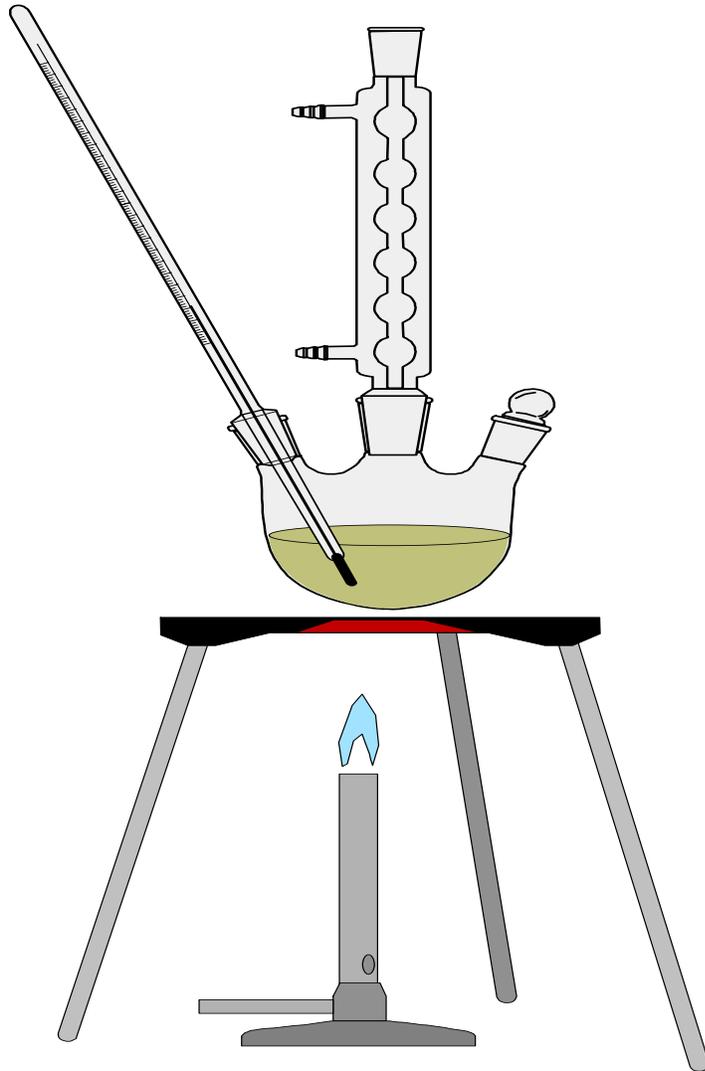
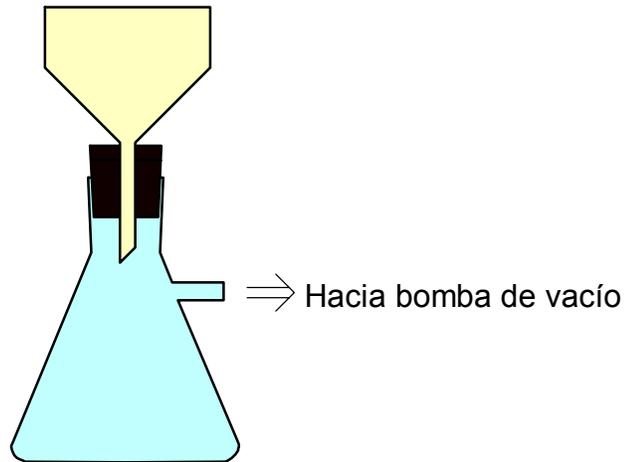


Figura 22. Equipo de filtración al vacío.



Fotografías de la experimentación

Figura 23. Muestra de bambú (*Guadua angustifolia*) pulverizada.



Figura 24. Muestra de bambú en hidróxido de sodio antes del tratamiento.



Figura 25. Equipo para extracción de celulosa. (Método de Kraft)



Figura 26. Extractos obtenidos después del tratamiento por el método Kraft.



Figura 27. Filtración al vacío de los extractos de la madera.



Figura 28. Filtración al vacío de los extractos de la madera.



Figura 29. Equipo de filtración al vacío.

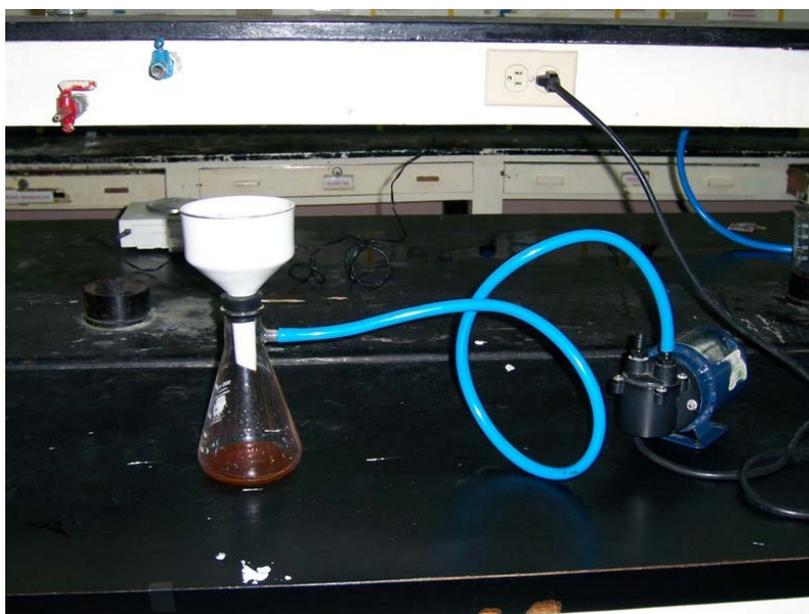


Figura 30. Material sólido obtenido de la filtración.



Figura 31. Ataque con ácido nítrico.

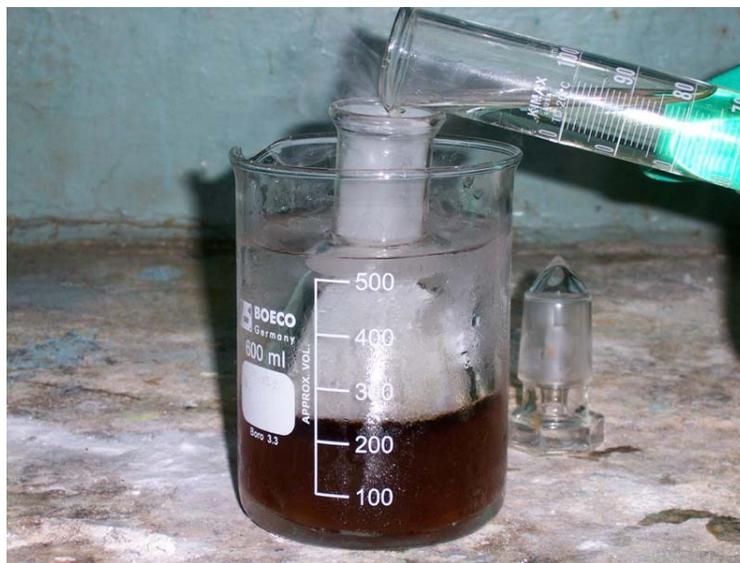


Figura 32. Comparación de las soluciones previa al ataque con ácido nítrico y después del ataque con ácido nítrico.



Figura 33. Pruebas de identificación realizadas a la muestra A.



Figura 34. Pruebas de identificación realizadas a la muestra B.

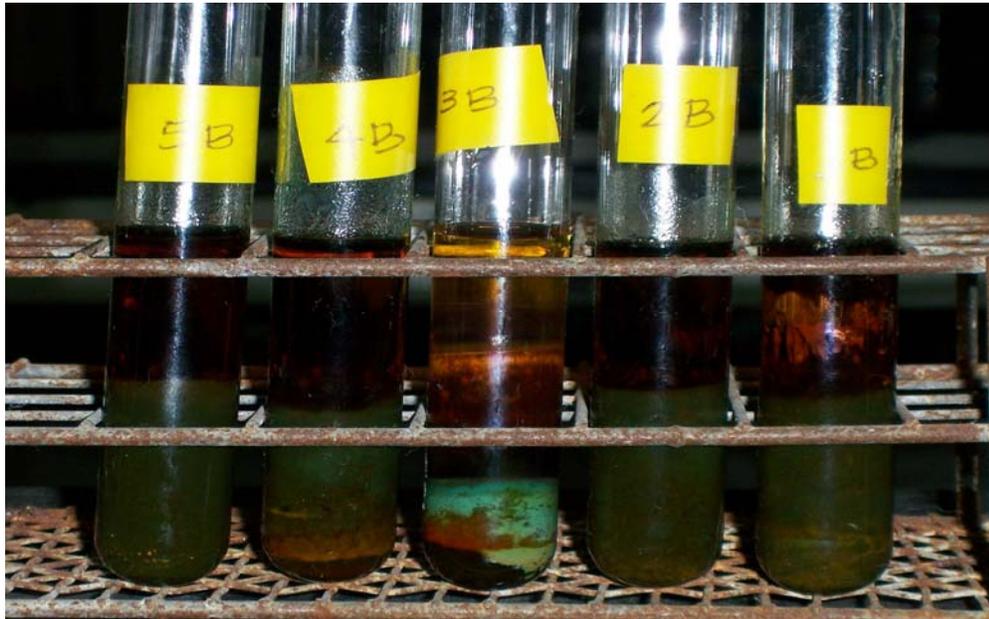


Figura 35. Pruebas de identificación realizadas a la muestra C.



Figura 36. Etapa de filtración para obtener los precipitados.



Figura 37. Precipitados de óxido cuproso e hidróxido de cobre obtenidos.

