

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**OBTENCIÓN DE FURFURAL A PARTIR DE DESECHOS
AGROINDUSTRIALES**

TESIS

**PRESENTADA A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR**

**DORA MARÍA GARCÍA MIRANDA
AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE
INGENIERA QUÍMICA**

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 1999

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 tesis titulado:

OBTENCIÓN DE FURFURAL A PARTIR DE DE DESECHOS AGROINDUSTRIALES

tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 28 de abril de 1999.

A handwritten signature in cursive script, reading 'Dora María García Miranda', with a long horizontal flourish extending to the right.

Dora María García Miranda

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

NÓMINA DE LA JUNTA DIRECTIVA

DECANO: Ing. Herbert René Miranda Barrios
VOCAL I : Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II : Ing. Carlos Humberto Pérez Rodríguez
VOCAL III : Ing. Jorge Benjamín Gutiérrez Quintana
VOCAL IV : Br. Oscar Stuardo Chinchilla Guzmán
VOCAL V : Br. Mauricio Alberto Grajeda Mariscal
SECRETARIA: Inga. Gilda Marina Castellanos Baiza de Illescas

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO: Ing. Herbert René Miranda Barrios
EXAMINADOR: Dr. Rodolfo Francisco Espinosa Smith
EXAMINADOR: Ing. Carlos Salvador Wong Davi
EXAMINADOR: Ing. José Manuel Tay Oroxom
SECRETARIA: Inga. Gilda Marina Castellanos Baiza de Illescas



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



t

Guatemala, 11 de agosto de 1999

Ingeniero
Otto de León
Director
Escuela Ingeniería Química
Presente.

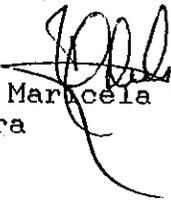
Estimado Ing. de León:

Por este medio me dirijo a usted para comunicarle que he revisado el informe final de tesis de la estudiante universitaria DORA MARIA GARCIA MIRANDA, titulado "OBTENCION DE FURFURAL A PARTIR DE DESECHOS AGROINDUSTRIALES", el cual asesoro.

Al respecto, me permito informarle que despues de haber terminado la revisión considero que llena los requisitos para ser presentada a su consideración.

Agradeciendo la atención a la presente, le saluda respetuosamente,

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"


Ingeniera Química Telma Maracéla Cano Morales
Asesora



FACULTAD DE INGENIERIA

Ref. WGAM.0045.99

Guatemala, 12 de agosto de 1999

Ingeniero
Otto Raúl de León de Paz
Director
Escuela Ingeniería Química
Presente.

Estimado Ingeniero de León:

Atentamente me dirijo a usted para responder a su oficio Ref. EIQ. 191.99, mediante el cual se solicita revisar el informe final de tesis de la estudiante universitaria DORA MARIA GARCIA MIRANDA, titulado "OBTENCION DE FURFURAL A PARTIR DE DESECHOS AGROINDUSTRIALES" el cual fue asesorado por la Ingeniera Telma Maricela Cano Morales.

Al respecto, me permito informarle que después de haber terminado la revisión del mencionado informe y de haberle hecho las correcciones pertinentes, considero que llena los requisitos para ser aprobada por parte de la Escuela como trabajo de tesis, por lo cual se lo remito y lo pongo a su consideración.

Agradeciendo la atención a la presente, le saluda respetuosamente,

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"

M. en Ing. Williams G. Alvarez Mejía
Profesor Titular V
Area de Operaciones Unitarias

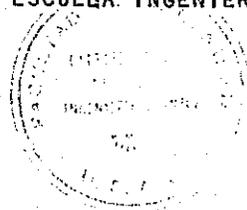
**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA**



FACULTAD DE INGENIERIA

El Director de la Escuela de Ingeniería Química, Ing. Otto Raúl de León de Paz, después de conocer el dictamen del Asesor con el Visto Bueno del Jefe de Departamento, al trabajo de Tesis de la estudiante Dora María García Miranda, titulado: **OBTENCION DE FURFURAL A PARTIR DE DESECHOS AGROINDUSTRIALES**, procede a la autorización del mismo.


Ing. Otto Raúl de León de Paz
DIRECTOR ESCUELA INGENIERIA QUIMICA



Guatemala, octubre de 1,999.

**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA**



FACULTAD DE INGENIERIA

El Decano de la Facultad de Ingeniería, luego de conocer la autorización por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al trabajo de Tesis titulado: **OBTENCION DE FURFURAL A PARTIR DE DESECHOS AGROINDUSTRIALES** de la estudiante, **Dora María García Miranda**, procede a la autorización para la Impresión de la misma.

IMPRIMASE:


Ing. Herbert René Miranda Barrios
DECANO



Guatemala, octubre de 1,999.

ACTO QUE DEDICO

A:

Dios y la Virgen María.

Mis padres:

Angel Roberto García Castillo

María Bernarda Miranda Vda. de García.

Mis abuelitos: Roberto (Q.E.P.D.), Juan, Dora y Cándida.

Mis hermanas.

Universidad San Carlos de Guatemala.

Facultad de Ingeniería.

AGRADECIMIENTOS

A:

Dios y la Virgen María

Mis Padres:

Angel Roberto García Castillo (Q.E.P.D.): que desde el cielo suspenda su sueño y se regocije con mi triunfo.

María Bernarda Miranda Vda. de García: a quien le debo haber alcanzado esta meta y por su apoyo, amor y comprensión.

Mis Abuelitos: muchas gracias por sus oraciones y la ayuda que siempre me brindaron.

Mis hermanas: especialmente a Angela, por la constante alegría que siempre me brindó.

Mis amigas y amigos: que me acompañaron y ayudaron en todo momento.

Inga. Thelma Cano e Ing. Williams Alvarez : por su ayuda incondicional.

Lic. Jorge Arango, Mayra Mendez y Herlinda Alvarez: por sus consejos.

Universidad San Carlos de Guatemala: en especial a la Facultad de Ingeniería, lugar donde adquirí los conocimientos que me permitieron formarme profesionalmente.

Personal de Secretaría Nacional de Ciencia y Tecnología.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	IV
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XI
OBJETIVOS.....	XIII
HIPÓTESIS	XIII
RESUMEN	XIV
INTRODUCCIÓN	XV
1. ANTECEDENTES	
1.1 Compuestos heterocíclicos	1
1.2 Propiedades y producción comercial del furfural	
1.2.1 Clasificación química y propiedades físicas	
1.2.1.1 Clasificación química	2
1.2.1.2 Propiedades físicas	3
1.2.1.3 Transformación del furfural	5
1.2.2 Producción del furfural	
1.2.2.1 Costos de producción	6
1.2.2.2 Aumento de producción	8

1.2.2.3	Usos comerciales y potenciales del furfural	8
	1.2.2.3.1 Usos directos del furfural..	9
1.3	Normas de calidad	
1.3.1	Envase, manipulación y transporte	10
1.4	Técnicas de producción de furfural	
1.4.1	Proceso discontinuo de la compañía Quaker Oats	11
1.4.2	Obtención de furfural a partir de cascarilla de algodón, café y arroz	12
2.	DISEÑO EXPERIMENTAL	
2.1	Modelo estadístico	15
2.2	Análisis de varianza	15
3.	PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	
3.1	Materiales	17
3.2	Reactivos	17
3.3	Procedimiento	17
3.4	Recursos materiales	21
3.5	Recursos humanos	18
7.	RESULTADOS	19

8. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	25
CONCLUSIONES	30
RECOMENDACIONES	31
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	32
BIBLIOGRAFÍA	33
ANEXOS	35

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Figuras

No.	Título	Pág.
1	Constantes físicas del furfural	3
2	Contenido de pentosanos en algunas materias primas	4
3	Poder calorífico en algunos materiales de desecho	7
4	Diseño aleatorio	14
5	Rendimiento de furfural según la cantidad de tusas de elote y tipo de catalizador	21
6	Rendimiento de furfural según la cantidad de bagazo de caña y tipo de catalizador	22
7	Rendimiento de furfural según la cantidad de cascarilla de cebada y tipo de catalizador	23
8	Rendimiento de furfural en función de la cantidad y tipo de material	24

Tablas

No.	Título	Pág.
I	Análisis de varianza	16
II	Rendimiento de furfural según la cantidad de tusas de elote y tipo de catalizador	21
III	Rendimiento de furfural según la cantidad de bagazo de caña y tipo de catalizador	22
IV	Rendimiento de furfural según la cantidad de cascarilla de cebada y tipo de catalizador	23
V	Rendimiento de furfural en función de la cantidad y tipo de material	24
VI	Cantidad de furfural en función del tipo de tratamiento	35
VII	Cantidades de agua y ácido usados en solución, según la cantidad de cascarilla de cebada	36
VIII	Cantidades de agua y ácido usados en solución, según la cantidad de bagazo de caña	36
IX	Cantidades de agua y ácido usados en solución, según la cantidad de tusa de elote	37
X	Análisis de varianza	39
XI	Resumen de análisis de varianza	40

XII	Rendimiento de furfural al usar tres diferentes cantidades de tusa de elote	41
XIII	Rendimiento de furfural al usar tres diferentes cantidades de bagazo de caña	41
XIV	Rendimiento de furfural al usar tres diferentes cantidades de cascarilla de cebada	42
XV	Análisis de varianza para determinar si influye la cantidad de cascarilla de cebada, en la producción de furfural al usar H_2SO_4 como catalizador	43
XVI	Análisis de varianza para determinar si influye la cantidad de cascarilla de cebada, en la producción de furfural al usar HCl como catalizador	44
XVII	Análisis de varianza para determinar si influye la cantidad de bagazo de caña, en la producción de furfural al usar H_2SO_4 como catalizador	45
XVIII	Análisis de varianza para determinar si influye la cantidad de bagazo de caña, en la producción de furfural al usar HCl como catalizador	46
XIX	Análisis de varianza para determinar si influye la cantidad de tusas de elote, en la producción de furfural al usar H_2SO_4 como catalizador	47

XX	Análisis de varianza para determinar si influye la cantidad de tusas de elote, en la producción de furfural al usar HCl como catalizador	48
XXI	Análisis de varianza para determinar si influye el tipo de material en la producción de furfural al usar H ₂ SO ₄ como catalizador	49
XXII	Análisis de varianza para determinar si influye el tipo de material en la producción de furfural al usar H ₂ SO ₄ como catalizador	50
XXIII	Análisis de varianza para determinar si influye el tipo de material en la producción de furfural al usar H ₂ SO ₄ como catalizador	51
XXIV	Análisis de varianza para determinar si influye el tipo de material en la producción de furfural al usar HCl como catalizador	52
XXV	Análisis de varianza para determinar si influye el tipo de material en la producción de furfural al usar HCl como catalizador	53
XXVI	Análisis de varianza para determinar si influye el tipo de material en la producción de furfural al usar HCl como catalizador	54
XXVII	Análisis de varianza para determinar si influye el tipo catalizador en la producción de furfural al usar tusas de elote como materia prima	55
XXVIII	Análisis de varianza para determinar si influye el tipo catalizador en la producción de furfural al usar tusas de elote como materia prima	56

XXIX	Análisis de varianza para determinar si influye el tipo catalizador en la producción de furfural al usar tusas de elote como materia prima	57
XXX	Análisis de varianza para determinar si influye el tipo catalizador en la producción de furfural al usar bagazo de caña como materia prima	58
XXXI	Análisis de varianza para determinar si influye el tipo catalizador en la producción de furfural al usar bagazo de caña como materia prima	59
XXXII	Análisis de varianza para determinar si influye el tipo catalizador en la producción de furfural al usar bagazo de caña como materia prima	60
XXXIII	Análisis de varianza para determinar si influye el tipo catalizador en la producción de furfural al usar cascarilla de cebada como materia prima	61
XXXIV	Análisis de varianza para determinar si influye el tipo catalizador en la producción de furfural al usar cascarilla de cebada como materia prima	62

LISTADO DE SÍMBOLOS

Σ	Sumatoria
$C_5H_4O_2$	Furfural
P1	Cascarilla de cebada
P2	Bagazo de caña
P3	Tusa de elote
M1	40 gramos
M2	80 gramos
M3	20 gramos
C1	HCl
C2	H_2SO_4
HCl	Ácido clorhídrico
H_2SO_4	Ácido sulfúrico
Yi	Variable respuesta

Yip Variable promedio respuesta
SSt Suma de cuadrados
SStrat Suma media de cuadrados

GLOSARIO

Análisis de varianza	Método estadístico para comparar dos condiciones o tratamientos de un experimento.
Catalizador	Sustancia que aumenta la velocidad de una reacción química, sin tomar parte en ella.
Destilación	Separación de una solución líquida en sus componentes mediante evaporación y condensación.
Disolvente	Componente que en una solución se encuentra en la mayor cantidad.
Extracción	Separar mezclas con temperaturas de ebullición próximas, aprovechando las diferencias de estructura química, al poner en contacto dos fases para permitir la transferencia de masa y separarlas después.
Furfural	Principal de los compuestos heterocíclicos, que contiene el anillo furánico de cinco miembros, caracterizado por un átomo de oxígeno.
Heterocíclico	Compuesto químico que en su estructura tiene un anillo formado por más de un tipo de átomos.

Neutralización	Reacción de un ácido con una base, en la cual se produce agua.
Punto de ebullición	Temperatura a la cual la presión de vapor de un líquido iguala la presión externa.
Punto de fusión	Temperatura a la cual las fases sólidas y líquidas están en equilibrio.
Saturar	Añadir un exceso de soluto a una cantidad de disolvente líquido, hasta que la concentración de soluto disuelto sea constante.

OBJETIVOS

1. Crear un procedimiento para obtener furfural a partir de la cascarilla de cebada, del bagazo de caña de azúcar y tusas de maíz.
2. Determinar qué tipo de desecho agroindustrial tiene el mejor rendimiento de furfural.

HIPÓTESIS

- El furfural puede obtenerse a partir de desechos agroindustriales, realizando primero una destilación seguida de una extracción con éter.
- El mayor rendimiento de furfural se obtiene utilizando las tusas de elote, como materia prima en el proceso de producción.
- El ácido sulfúrico es un catalizador más efectivo, que el ácido clorhídrico, para extraer furfural de material vegetal.

RESUMEN

Se produjo furfural a partir de desechos agroindustriales: la cascarilla de cebada, bagazo de caña y tusas de elote.

A la materia prima se le agregó una solución de ácido más agua y se destiló. Se hizo una segunda destilación y después una extracción con éter para tener solo una fase furfural / éter. Por último se evaporó el éter para tener únicamente furfural, al cual se le aplicó la prueba de anilina con resultado positivo. Se concluye en que el producto obtenido sí es furfural y sus características físicas son: color amarillo claro, olor a almendra.

Las destilaciones se llevaron a cabo a temperatura y presión constante. La destilación con la que se lleva a cabo la reacción siempre se trabajó con tiempo de reacción constante (una hora).

El mejor rendimiento de furfural se tiene cuando se usan tusas de elote como materia prima y ácido sulfúrico como catalizador.

INTRODUCCIÓN

El furfural es un compuesto heterocíclico que tiene diversas aplicaciones en la industria de la fundición y en la refinación de aceites minerales; puede obtenerse a partir de productos agroindustriales, de los cuales se produce una gran cantidad en países en desarrollo, sin embargo, no son explotados, tal es el caso de Guatemala. En este trabajo se presenta el análisis detallado del furfural, cómo aprovechar los residuos agroindustriales para obtener dicho compuesto, su proceso de obtención que incluye: reactivos, equipo a utilizar, temperatura y presión de trabajo; así como la demanda a nivel mundial para proporcionar una idea de la importancia de su producción y exportación.

La fase experimental consistió en extraer furfural de la cascarilla de cebada, tucas de elote y bagazo de caña para determinar qué residuo produce la mayor cantidad de dicho compuesto; además, se determinó la relación existente entre la proporción de materia prima a utilizar y la cantidad de furfural a obtener y se evaluó la influencia de dos tipos de catalizadores en la reacción.

1. ANTECEDENTES

1.1 Compuestos heterocíclicos

En los compuestos orgánicos conocidos existe gran variedad de estructuras, muchas de las cuales poseen sistemas anulares; cuando el anillo está constituido por átomos de carbono y al menos otro elemento, el compuesto puede clasificarse como heterocíclico.

Las aplicaciones de los compuestos heterocíclicos son diversas: predominan entre los tipos de compuestos empleados como productos farmacéuticos, agroquímicos y de uso veterinario se emplean como aditivos abrillantadores, antioxidantes, inhibidores de la corrosión y otras funciones más; muchos colorantes y pigmentos poseen estructuras de este tipo.

Es importante mencionar que los compuestos heterocíclicos están ampliamente distribuidos en la naturaleza y tienen un extenso empleo porque es posible modificar su funcionalidad manipulando levemente su estructura, además es posible incorporar grupos funcionales como parte del sistema anular.

El furfural es un compuesto heterocíclico que cada vez tiene mayor aplicación como intermediario en síntesis orgánica, esto se debe a que un sistema anular, relativamente estable puede someterse a una serie de pasos sintéticos y luego romperse en la etapa apropiada de la síntesis para descubrir otros grupos funcionales.

El furfural fue descubierto en 1824 y se empezó a fabricar desde el decenio de 1920. (furan-2-carboxaldehído) está disponible a bajo costo, ya que se obtiene a partir de ciertos desechos y residuos agroindustriales abundantes en países en vías de desarrollo.

Puede obtenerse a partir del furfural una serie de productos a base de petróleo incluyendo las fibras sintéticas y las resinas plásticas.

1.2 Propiedades y producción comercial del furfural

1.2.1 Clasificación química y propiedades físicas

1.2.1.1 Clasificación química

El furfural (furfuraldehído, fural, 2-furaldehído o furol, erróneamente denominado furfuro) es el elemento principal de los compuestos heterocíclicos, llamados furanos. El furfural es un aldehído derivado de los carbohidratos complejos (hemicelulosa) conocidos como pentosanos, que se encuentran en la celulosa en muchos tejidos de plantas. Como no se ha descubierto un proceso de síntesis rentable, toda la producción del furfural se basa en los residuos que contienen pentosanos, obtenidos mediante la transformación de diversos productos agrícolas y forestales.

1.2.1.2 Propiedades físicas

El furfural ($C_5H_4O_2$) es un aldehído líquido de olor penetrante, parecido al de las almendras y tiene un alto grado de estabilidad térmica. Recién destilado es incoloro, pero expuesto al aire adquiere un color pardo. El furfural industrial es de un color entre amarillo claro y marrón. A continuación se presenta un cuadro con algunas de las propiedades más importantes del furfural.

Figura No. 1: Constantes físicas del furfural

CONSTANTES FISICAS	FURFURAL
Peso molecular	96.08
Punto de ebullición, °C	161.7
Peso específico	20/4 °C: 1.598
Índice de refracción	n 20/D: 1.5261
Punto de inflamación, °C	(vaso cerrado) 62
Punto de congelación, °C	- 36.5
Punto de fusión, °C	-
Libras/galón 20°C	9.68
Solubilidad en agua °C	8.3% peso

Teóricamente, todos los pentosanos que contienen materias fibrosas podrían utilizarse como materia prima para la producción del furfural. Sin embargo, para que sea rentable, la producción industrial de furfural exige un contenido mínimo de un 18-20 % de pentosano.

Sólo la tercera parte aproximadamente de los pentosanos contenidos en las materias primas puede transformarse en furfural a través de los métodos de fabricación existentes, por lo tanto es conveniente usar las materias primas con mayor contenido de pentosanos y a continuación se presenta este tipo de información.

Figura No. 2: Contenido de pentosanos en algunas materias primas

Materia prima	Contenido promedio de pentosanos (%)
Tusas de maíz	30 –32
Cáscara de cebada	Min. 32
Cáscara de almendra	Min. 30
Bagazo y médulas de bagazo	25 –27
Cáscara de semilla de algodón	27
Cáscara de avellana	24
Maderas duras	21 – 24
Cáscara de semilla de girasol	23 - 25
Cáscara de arroz	16 –18
Corteza de haya	19 –21
Madera de castaño después de haberse extraído el tanino	18
Residuos de aceituna	21- 23
Madera de quebracho después de haberse extraído el tanino	19

1.2.1.3 Transformación del furfural en sus principales derivados

La transformación química del furfural en alcohol furfurílico y alcohol tetrahidrofurfurílico mediante la hidrogenación catalítica exige el empleo de un equipo muy especializado.

El tetrahidrofurano se produce a partir del furfural que se descarboniza en furano en presencia de vapor de agua y un catalizador de zinc-cromo-molibdeno, el cual se transforma después en tetrahidrofurano por hidrogenación catalítica.

El alcohol furfurílico es el derivado químico más importante del furfural y es el que determina en gran medida la evolución futura del mercado del furfural. Sin embargo, las posibilidades de utilización final de los otros derivados son numerosas y no cabe excluir que aumente la demanda de algunos de esos productos.

1.2.2 Producción de furfural: tecnología y costos

Al inicio el furfural se usaba principalmente como solvente para la refinación de los aceites lubricantes. Durante la Segunda Guerra Mundial se empezó a utilizar como solvente en la extracción del butadieno, estos procedimientos fueron puestos en práctica en los países industrializados. En 1964 se descubrió que éste podía ser utilizado como resina; desde entonces se han construido fábricas de furfural en varios países, incluyendo países en vías de desarrollo. En 1955, la República Dominicana se convirtió en el primer país en desarrollo productor de furfural. La capacidad mundial de producción de furfural ha aumentado cada día más. Otros países donde se está considerando la producción de furfural son: Bolivia, Colombia, Ecuador, Venezuela, Cuba, Puerto Rico, India, Pakistán, Costa de Marfil y Zambia.

El precursor de la producción de furfural fue la compañía Quaker Oats, que inicialmente utilizó un proceso discontinuo de su invención; después se realizaron investigaciones con el objetivo de elaborar un proceso continuo de producción por hidrólisis.

Los principales factores a considerar, en cualquier proceso en el que se produce furfural, son las condiciones de reacción como: la presión, la naturaleza del catalizador, la estructura y la densidad de la materia prima que ha de utilizarse.

Como la producción de furfural requiere grandes cantidades de materias primas, hay que tener en cuenta que tipo de materia utilizar según las estaciones del año, pues hay productos que sólo están disponibles en cierta época.

1.2.2.1 Costos de producción

Estos costos dependen de las condiciones locales, y principalmente del costo de la materia prima. El precio de los diferentes materiales de desecho utilizables como materia prima está influido por los otros posibles usos que se le puedan dar a estos materiales. Por ejemplo, la cáscara de diversos granos puede servir de alimento para animales, las tusas del maíz pueden usarse como soporte de vitaminas para esos mismos alimentos o como aditivo de las arenas de fundición. El bagazo se utiliza como combustible para producir vapor en las refinerías de azúcar, y se emplea también para fabricar papel y tableros de partículas.

Un criterio común para comparar los precios de los diferentes desechos es su poder calorífico, el valor económico del material depende del costo de la cantidad de petróleo necesaria para producir una cantidad equivalente de calor, es decir el precio de los materiales aumenta al aumentar el valor del petróleo.

Figura No. 3: Poder calorífico de algunos materiales de desecho

Materia prima	Poder calorífico inferior (kcal/kg , seco)
Cáscara de avellana	4.90
Tusas de maíz	4.45
Bagazo	4.40
Madera de abedul	4.40
Corteza de haya	4.22
Madera de haya	4.20
Cáscara de cebada	4.15

El almacenamiento de los desechos puede aumentar el costo de estos últimos, por la cantidad de materias primas que se requieren y del carácter estacional de algunas de ellas. El pretratamiento a que se somete la materia prima también aumenta los costos.

Cuando la producción es a nivel industrial debe realizarse un estudio completo sobre las posibilidades de obtener materias primas en suficientes cantidades y costos adecuados. Otros factores importantes a considerar son: el costo del vapor, el agua de enfriamiento, los productos químicos, la energía eléctrica, así como los gastos de mantenimiento.

1.2.2.2 Aumento de la capacidad de producción

Durante los tres primeros decenios de producción comercial, el descubrimiento de nuevos é importantes usos finales para el furfural determinó el crecimiento de la capacidad de producción.

Los Estados Unidos constituyen el principal mercado de furfural, que son los principales consumidores. El Reino Unido y la República Federal de Alemania son los otros dos consumidores más importantes. El furfural y sus derivados se usan en otros muchos países, incluyendo los países en desarrollo. La República Dominicana y los Estados Unidos son los importadores de furfural al mercado mundial.

1.2.2.3 Usos comerciales actuales y potenciales del furfural

El furfural es un solvente selectivo de alto grado de reactividad, propiedad por la cual tiene múltiples usos. Las dos categorías de usos finales más importantes del furfural son: utilización directa con fines industriales y su empleo como compuesto químico de base para fabricar productos de furano. El furfural con frecuencia compite con sustancias derivadas del petróleo.

1.2.2.3.1 Usos directos del furfural

- **Solvente selectivo para la refinación de aceites minerales:** éste es el uso directo más importante del furfural, que se utiliza para separar compuestos cíclicos insaturados que son solubles en furfural. La eliminación de estos compuestos aumenta en forma considerable el índice de viscosidad de los aceites lubricantes y hace al mineral resistente a la oxidación. El uso de furfural también disminuye el azufre y los residuos de carbono. En esta industria el principal competidor del furfural es el fenol.

En este campo otros de los usos del furfural son: mejorar la calidad de los aceites minerales, refinación de gasóleos, aceites vegetales y animales.

- **Medio de destilación en la extracción del butadieno:** en las grandes fábricas se usa el furfural como medio de destilación en el proceso extractivo de destilación para separar los hidrocarburos C4 del petróleo. También tiene aplicación en la extracción de productos aromáticos a partir de diversas fracciones minerales.

- **Agentes de decoloración para la resina de la madera:** por medio de la aplicación del furfural en la destilación fraccional al vapor se pueden eliminar de la resina de madera determinadas sustancias colorantes; la resina así obtenida se utiliza en las industrias del jabón, del barniz y del papel.

- **Solvente y auxiliar para el tratamiento del carbón y de los productos del carbón:** el furfural se usa como medio para separar el antraceno del aceite de antraceno mediante un proceso selectivo de cristalización o sublimación.

- **Formación de resina:** el fenol y el furfural reaccionan con facilidad en la formación de resinas fusibles y solubles muy fluidas, características útiles en el moldeado de piezas de gran tamaño o de piezas complicadas.

- **Solvente reactivo para la fabricación de muelas de rectificar ligadas con un resinoide:** ésta es una aplicación que se está utilizando desde hace años. El furfural actúa como plastificante y agente humectante de una solución furfúrica y resina fenólica, que después se moldea en frío y se cuece para endurecer la resina. El furfural reacciona en presencia de la resina y se convierte en parte integrante del aglutinante.

- **Producto químico de base:** el furfural se utiliza para fabricar el alcohol furfúrico y alcohol tetrahydrofurfúrico a los cuales les corresponde más de los dos tercios del consumo mundial de furfural.

1.3 Normas de calidad

El furfural y sus derivados se comercializan como material de calidad técnica, con grado de pureza igual o mayor al 98%. Para que pueda ser utilizado en los laboratorios o en la industria farmacéutica, es necesario que el producto se acerque al 100% de pureza.

No existen normas internacionales de comercio para el furfural y sus derivados.

1.3.1 Envase, manipulación y transporte

El furfural y sus derivados son solventes fuertes por lo tanto deben envasarse y almacenarse en recipientes de acero o de aluminio. En ningún caso deben utilizarse contenedores interiormente barnizados de laca o de resina.

El almacenamiento del furfural no presenta problema técnico especial; si se guarda durante varios meses su color se oscurece, este oscurecimiento es más rápido si se expone al aire y en ese caso también aumenta la acidez.

El furfural no está clasificado como producto químico tóxico, pero deben tenerse ciertas precauciones pues puede provocar irritación en los ojos y nariz o manchas en la piel si el contacto es prolongado. Su inflamabilidad es comparable con la del queroseno.

1.4 Técnicas de producción del furfural

1.4.1 Proceso discontinuo de la compañía Quaker Oats

A continuación se reproduce la descripción de este proceso, que figura en un estudio publicado por la ONUDI en 1974:

Con el proceso clásico de la Quaker Oats el furfural se obtiene en una sola operación en la que se usan grandes digestores rotatorios. La materia prima se carga en los digestores rotatorios y se trata con ácido sulfúrico diluido. El furfural formado se extrae por destilación en corriente de vapor de agua. Al salir de los digestores los vapores se condensan y pasan a una columna de destilación. Los vapores salientes de la parte alta, ricos en furfural, se condensan y se enfrían, separándose en dos capas; la capa de agua se restituye a una columna de destilación para recuperar el furfural, la capa de furfural que contiene 6% de agua, se envía a una columna de deshidratación. (Ref. No. 1)

1.4.2 Obtención de furfural a partir de la cascarilla de algodón, café y arroz

El siguiente es un experimento realizado en Guatemala, por los ingenieros René Filiberto Arias Barrios y Gilmar Obdulio Tronconi Sandoval (Ref. No. 2)

Procedimiento de operación:

1. Se vertió dentro del reactor la solución de ácido sulfúrico con concentración definida para la prueba.
2. Adición de 1 Kg. de cascarilla sujeta a prueba.
3. Cerrado del reactor y verificación del equipo.
4. Agitación durante 10 minutos para lograr homogeneidad.
5. Alimentación de vapor a la chaqueta del reactor, elevando la presión interior del mismo hasta la presión de operación definida para la prueba.
6. La muestra obtenida someterla al método de determinación de furfural.

2. DISEÑO EXPERIMENTAL

Variable dependiente: rendimiento de furfural.

Variables independientes

- **Cascarilla de cebada:** se utilizó cebada de tipo primavera, ya que ésta es la que tiene la mayor cantidad de cáscara celulósica (Aprox. 15%).
- **Bagazo de caña de azúcar :** se utilizó la variedad de caña NCo. 310 por su alto contenido en fibra.
- **Tusa de elote**

a cada variable se le llamó respectivamente P1, P2 y P3; se evaluó el rendimiento de furfural a partir de cada una de ellas, utilizando diferentes proporciones de masa: 40 g, 80 g y 20 g, a estas cantidades se les denominó: M1, M2 y M3, respectivamente. También se estableció la influencia del tipo de catalizador en la reacción por lo que se utilizaron dos tipos de catalizadores: ácido sulfúrico y ácido clorhídrico, los que se denominarán como C1 y C2.

De acuerdo a la información anterior, se calculó el número de tratamientos de la siguiente forma:

3 tipos de materia prima,

3 cantidades diferentes de masa,

2 clases de catalizadores. O sea:

= $3 \times 3 \times 2 = 18$ tratamientos.

A cada tratamiento se le practicarán 3 repeticiones, entonces:

$$\# = (18 \text{ Trats.}) * (3 \text{ Rep.}) = 54 \text{ corridas.}$$

Para determinar el orden en que se realizaron los tratamientos, se utilizó un diseño completamente al azar, haciendo un total de diez y ocho tratamientos con tres repeticiones cada uno y se obtuvo el cuadro siguiente:

Figura No. 4: Diseño aleatorio

NÚMERO	TRATAMIENTO	REPETICIONES		
		1	2	3
1	P1M1C1			
2	P1M1C2			
3	P2M1C1			
4	P3M1C2			
5	P2M1C2			
6	P3M2C2			
7	P2M2C2			
8	P1M2C1			
9	P2M2C1			
10	P2M3C2			
11	P2M3C1			
12	P1M3C1			
13	P3M3C2			
14	P3M1C1			
15	P1M2C2			
16	P1M3C2			
17	P3M3C1			
18	P3M2C1			

Donde al tratamiento 1 se le llamó P1M1C1, P1M1C2 al tratamiento 2 y así sucesivamente, tal como se presenta en la figura No. 4.

6.1 Modelo estadístico

$$Y_{ij} = \mu + T_i + E_{ij} \quad i = 1, 2, \dots, t$$

$$j = 1, 2, \dots, r$$

Donde:

Y_{ij} = Variable de respuesta de la ij-ésima unidad experimental.

μ = Efecto de la media general.

T_i = Efecto del i-ésimo tratamiento.

E_{ij} = Efecto del error experimental asociado a la ij-ésima unidad experimental.

Con los datos obtenidos se realizará un análisis de varianza para determinar cual es el mejor tratamiento.

6.2 Análisis de varianza

$H_0: T = T_i$ Todos los tratamientos producen el mismo efecto.

$H_a: T \neq T_i$ Al menos uno de los tratamientos produce efectos diferentes.

Tabla No. I: Análisis de varianza

FUENTES DE VARIACION	GRADOS DE LIBERTAD	SUMA DE CUADRADOS	CUADRADOS MEDIOS	Fc
TRATAMIENTOS	$t - 1$	$\sum Y_i^2/r - Y^2/tr$	SC_{trat}/gl_{trat}	Cm_{trat}/CM_{ee}
ERROR	$t(r-1)$	$SC_{tot} - SC_{trat}$	S_{cee}/g_{lee}	
TOTAL	$tr - 1$	$\sum_{i=1}^t \sum_{j=1}^r Y_{ij} - Y^2/tr$		

Regla de decisión

Rechazar H_0 si $F_c > F_t$

No rechazar H_0 , si $F_c < F_t$

F_t = valor que puede ser encontrado en tablas.

3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

3.1 Material

1 Matraz de tres litros de capacidad.

1 Conjunto de destilación.

1 Separador grande.

1 Aparato de destilación.

3.2 Reactivos

40 g de cascarilla de cebada,

Acido sulfúrico concentrado,

Carbonato de sodio,

Sal común,

Eter,

Cloruro de calcio,

Agua.

3.3 Procedimiento

1. Mezclar 284 ml de agua y aproximadamente 28 ml de ácido sulfúrico concentrado.
2. Colocar la mezcla anterior y 40 g de cascarilla de cebada en un matraz.
3. Destilar la mezcla.
4. Neutralizar el destilado con Na_2CO_3 y saturar con sal común.

5. Destilar del líquido aproximadamente 30 ml.
6. Saturar, el destilado formado, con sal común y extraer con éter.
7. Secar la solución con cloruro de calcio y destilar nuevamente.

El procedimiento es el mismo si la materia prima es bagazo de caña o tusas de elote, únicamente varían las cantidades de agua y ácido.

Para determinar si el producto obtenido es furfural, a cada una de las muestras se le realizó la prueba de la anilina que consistió en agregar al producto, contenido en un tubo de ensayo, una solución de fenilamonio (anilina + ácido acético). La reacción entre el furfural y la solución debe dar una coloración roja.

3.4 Recursos materiales

Las pruebas se realizaron en la Universidad de San Carlos de Guatemala, en el Laboratorio de Ingeniería Química y en el Laboratorio de la Sección de Química Industrial del Centro de Investigaciones de Ingeniería.

3.5 Recursos humanos

Asesora: Inga. Química Telma Cano.

Revisor: Ing. Williams Alvarez Mejía.

4. RESULTADOS

1. En el análisis de varianza para determinar si la cantidad de cascarilla de cebada, influye en la obtención de furfural, se tiene: $F_c = 195.62$, $F_t = 10.92$ al usar H_2SO_4 como catalizador y $F_c = 227.625$, $F_t = 10.92$ al usar HCl ($F_c > F_t$), la cantidad de cascarilla de cebada sí influye en el experimento.
2. En el análisis de varianza para determinar si la cantidad de bagazo de caña, influye en la producción de furfural, se tiene: $F_c = 43.90$, $F_t = 10.92$ al usar H_2SO_4 como catalizador y $F_c = 22.62$, $F_t = 10.92$ al usar HCl ($F_c > F_t$), la cantidad de bagazo de caña sí influye en el experimento.
3. Según el análisis de varianza, para determinar si la cantidad de tusas de elote influye en la obtención de furfural se tiene: $F_c = 261.44$, $F_t = 10.92$ al usar como catalizador H_2SO_4 y $F_c = 64.50$, $F_t = 10.92$ al usar HCl ($F_c > F_t$), la cantidad de tusas influye en la prueba.
4. El análisis de varianza, para determinar si el tipo de materia prima influye en la cantidad de furfural a obtener, indica: $F_c = 57$, $F_t = 10.92$; $F_c = 27.67$, $F_t = 10.92$; $F_c = 66.50$, $F_t = 10.92$, para 40, 80 y 20 gramos de materia prima respectivamente al usar H_2SO_4 como catalizador. En todos los casos $F_c > F_t$, el tipo de materia prima sí influye en la cantidad de furfural a obtener.
5. En el análisis de varianza, para condiciones similares a las del resultado 4, excepto que el catalizador es HCl ; se tiene: $F_c = 14.90$, $F_t = 10.92$; $F_c = 12.99$, $F_t = 10.92$; $F_c = 77.44$, $F_t = 10.92$; el tipo de materia prima sí influye en el experimento.

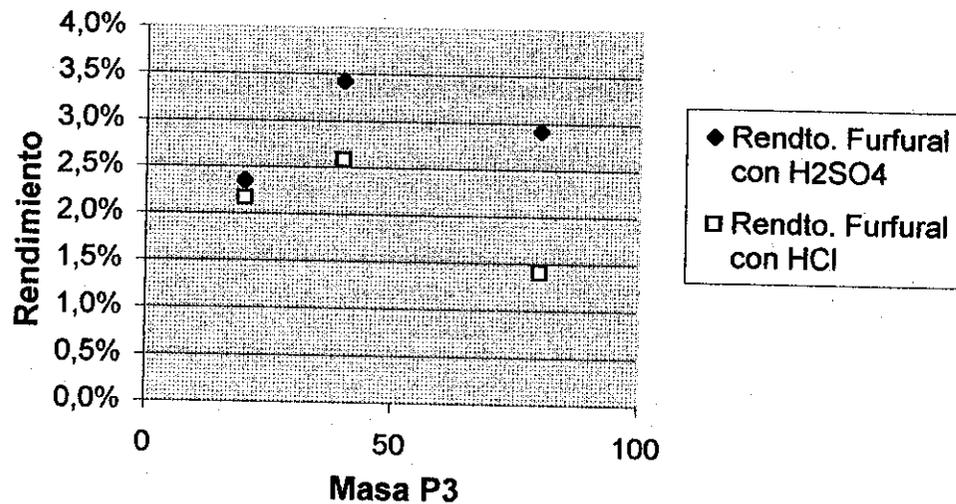
6. El tipo de catalizador, al usar cascarilla de cebada como materia prima, sí influye en la cantidad de furfural a obtener, pues según el análisis de varianza $F_c = 10.125$, $F_t = 6.61$; $F_c = 25.60$, $F_t = 6.61$ respectivamente para 40 y 80 gramos de cascarilla de cebada.
7. Cuando se usa bagazo de caña como materia prima, el tipo de catalizador sí influye en la cantidad de producto cuando las cantidades son pequeñas, según el análisis de varianza $F_c = 50.26$ y 7.98 para 20 y 40 gramos respectivamente, en ambos casos $F_t = 6.61$. Pero para 80 gramos $F_c = 1.8$ y $F_t = 6.61$, por lo tanto el tipo de catalizador no influye en el rendimiento.
8. Cuando se usan tusas de elote como materia prima, el tipo de catalizador influye en la cantidad de furfural a obtener, según el análisis de varianza: $F_c = 16.2$; 121.82 y 20.85 para 40, 80 y 20 gramos respectivamente, en todos $F_t = 6.61$.

Resultado No. 9

Tabla No. II: Rendimiento de furfural según la cantidad de tusas de elote y tipo de catalizador

Masa (g)	Rendimiento de furfural	
	H ₂ SO ₄	HCl
20	2,35%	2,17%
40	3,42%	2,58%
80	2,91%	1,41%

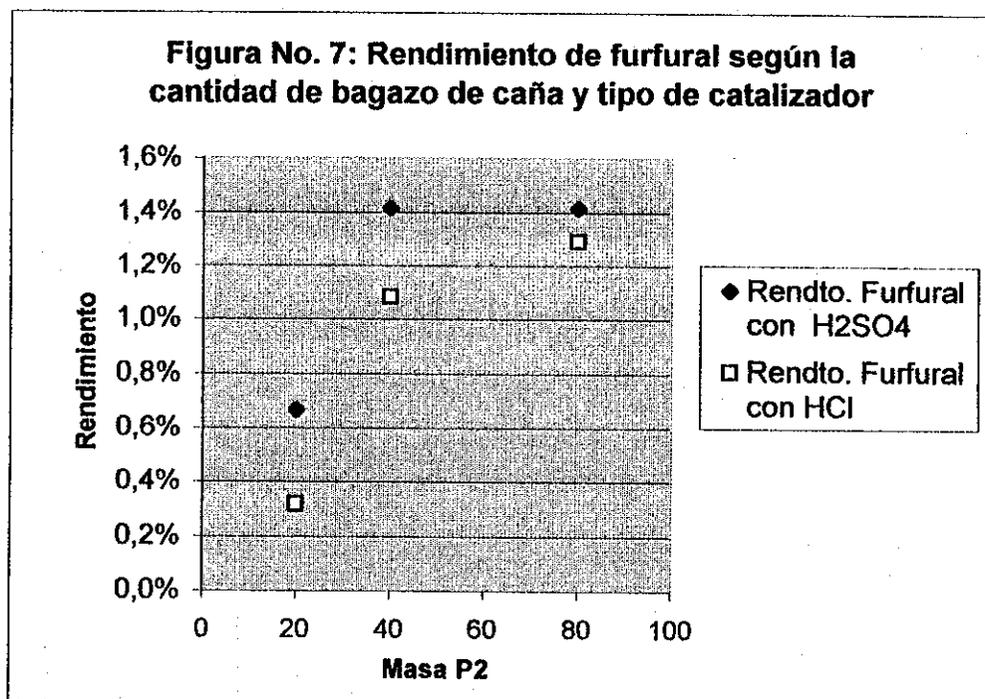
Figura No. 6: Rendimiento de furfural según la cantidad de tusas de elote y tipo de catalizador



Resultado No. 10

Tabla No.III: Rendimiento de furfural en función de la cantidad de bagazo de caña y tipo de catalizador

Masa (g)	Rendimiento de furfural	
	H ₂ SO ₄	HCl
20	0,67%	0,32%
40	1,42%	1,08%
80	1,42%	1,29%

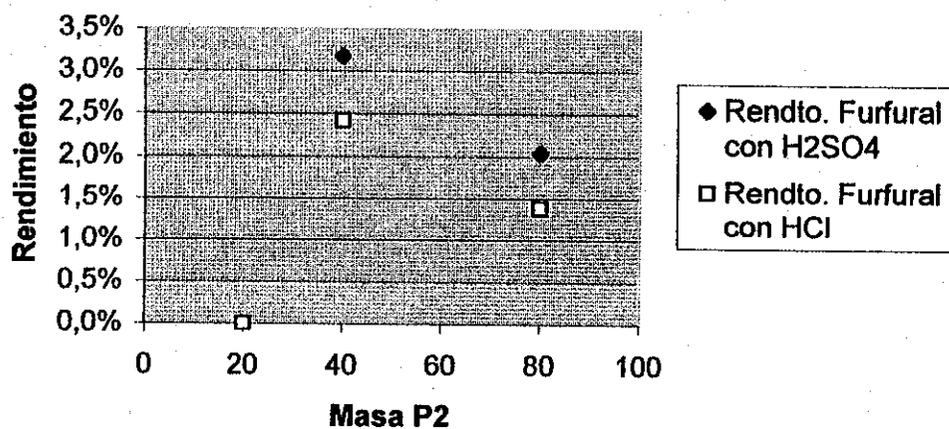


Resultado No. 11

Tabla No. IV: Rendimiento de furfural en función de la cantidad de cascarilla de cebada y tipo de catalizador

Masa (g)	Rendimiento de furfural	
	H ₂ SO ₄	HCl
20	0,00%	0,00%
40	3,17%	2,42%
80	2,04%	1,38%

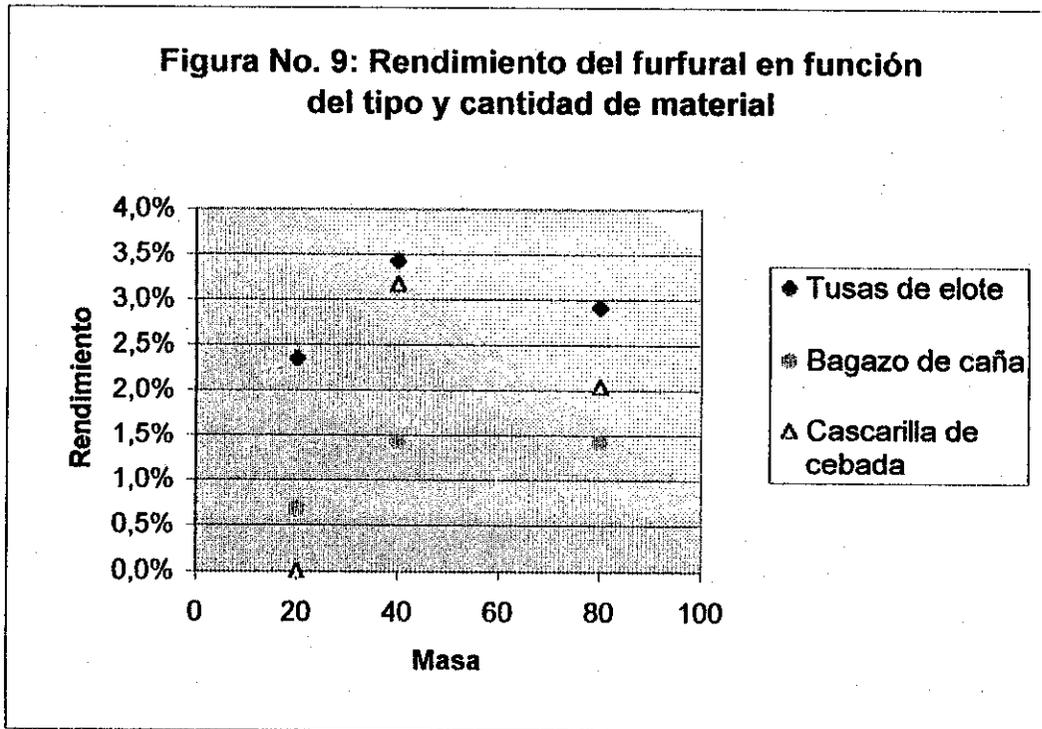
Figura No. 8: Rendimiento de furfural en función de la cantidad de cascarilla de cebada y tipo de catalizador



Resultado No. 12

Tabla No. V: Rendimiento de furfural en función del tipo y cantidad de material

Masa (g)	Tusas de elote	Bagazo de caña	Cascarilla de cebada
20	2,35%	0,67%	0,00%
40	3,42%	1,42%	1,42%
80	2,91%	1,42%	2,04%

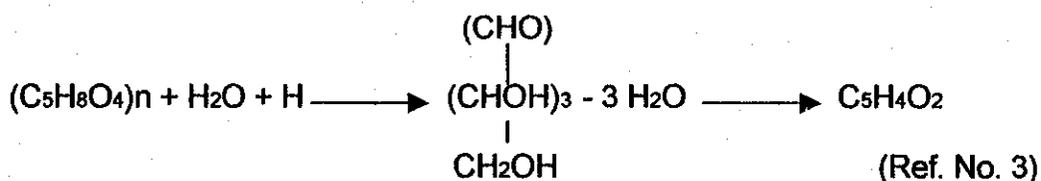


5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En la reacción para obtener furfural, las variables de estudio son: cantidad y clase de materia prima, así como el tipo de catalizador, para inferir sobre la producción de dicho compuesto en función de estas variables.

Los tipos de materia prima empleados son tres:

- tusas de elote, este material debe cortarse en fragmentos muy pequeños antes de utilizarlo, para mejorar el proceso, pues se comprobó que con trozos relativamente grandes no se obtiene suficiente destilado, debido a que las tusas obstruyen el paso del vapor formado durante la ebullición. Independientemente del tipo o cantidad de material con el cual se este trabajando, la primera destilación debe durar una hora, para mantener constante el tiempo de reacción la cual se lleva a cabo en esta etapa: los pentosanos pierden al hervir en solución con ácido fuertes, tres moléculas de agua y se forma furfural;



El ácido sirve como catalizador. En la práctica se utilizan dos tipos de ácidos: H_2SO_4 y HCl , los cuales se analizan por separado, para determinar si el catalizador influye en la cantidad de furfural a obtener cuando el tiempo de reacción es constante.

De acuerdo al análisis de varianza, explicado en la sección de diseño experimental y desarrollado en la sección de datos calculados (tablas No. XXV a XXVIII), de cada uno de los pares de datos (con H_2SO_4 y HCl) obtenidos de las distintas masas de tusa, se obtiene para todos $F_c > F_t$, lo cual indica que la hipótesis nula debe rechazarse y por lo tanto, se concluye que el tipo de ácido sí influye en la cantidad de producto a obtener.

Experimentalmente se determinó que al agregar a las tusas de elote una solución (H_2SO_4 ó $\text{HCl} / \text{H}_2\text{O}$) al 15% de ácido; es mejor catalizador el H_2SO_4 , no solo por llevar a cabo más rápido la reacción sino porque al neutralizar el destilado con CaCO_3 se requiere menos cantidad de base que al usar HCl , aumentando la cantidad hasta cinco veces, esto se debe a que las moléculas de HCl son más grandes que las de H_2SO_4 , por lo que es lógico este aumento en la cantidad de base, aunque se esté utilizando la misma cantidad de ácido en la solución respectiva.

La neutralización es necesaria porque el destilado tiene un pH de aproximadamente 2.40 esto es un índice que además de furfural existe ácido, estos dos compuestos pueden reaccionar y producir alcohol furfúrico; pero el motivo más importante de neutralizar es porque el furfural contenido en la solución debe extraerse con éter, para lo que es indispensable que solo halla en solución agua y furfural para que al agregar el éter se formen perfectamente dos fases: una de agua, insoluble en éter y otro de furfural + éter, completamente miscibles, para después evaporar el éter y obtener solo furfural.

El volumen de solución ácido/agua a utilizar depende del volumen ocupado por la materia prima; debe ser una cantidad tal que cubra perfectamente todas las tusas de elote para que pueda llevarse a cabo la reacción.

La cantidad de furfuraldehído recuperado depende también de cuanto se halla utilizado de tusas de elote, las cantidades usadas fueron pequeñas por tratarse de un experimento a nivel de laboratorio: 20, 40 y 80 gramos y se concluye que el máximo rendimiento se tiene a los 40 g de materia prima como se observa en los resultados: tabla No. II, figura No. 5.

- Bagazo de caña; este material no recibió tratamiento previo, ya que el bagazo de caña que sobra en los ingenios tiene el tamaño de partícula apropiada para realizar la primera destilación.

Se evaluó el rendimiento de furfural al utilizar H_2SO_4 y HCl como catalizadores y al aplicarles el análisis de varianza (tablas No. XVII, XXVII y XIX) se concluye que el tipo de ácido si influye en el rendimiento de furfural cuando se emplea poco bagazo, pero la influencia es nula al usar 80 gramos de bagazo de caña, según el análisis de varianza, ya que $F_c = 1.8$ y $F_t = 6.61$ o sea $F_t < F_c$, por lo tanto se acepto la hipótesis nula y al igual que con las tusas de elote el H_2SO_4 resultó ser el mejor catalizador.

En la sección de resultados: tabla No. III, figura No. 7, puede apreciarse la tendencia del rendimiento de furfural en función de la masa de bagazo de caña; el máximo rendimiento se tiene cuando se usan 40 gramos, esto es debido a que con esa cantidad se tienen las mejores condiciones para el proceso a nivel

de laboratorio: la cantidad es tal que la materia prima, para una hora de reacción no es poca como para que se queme ni tanta que ocupe casi todo el volumen del balón y la destilación no pueda llevarse a cabo satisfactoriamente.

- Cascarilla de cebada: esta se obtiene en grandes cantidades en la Cervecería Centro Americana y el tamaño de partícula es el ideal para el proceso, únicamente se presenta dificultad cuando se trabaja con cantidades muy pequeñas, porque las partículas son finas y es poco el volumen que ocupan, aproximadamente la tercera parte de lo que ocupan 20 gramos de tusas de elote y la mitad de 20 gramos de bagazo de caña. Puede observarse en los datos originales que cuando; se usan 20 gramos de cascarilla de cebada no se obtiene furfural debido a que el material se quema antes de cumplir una hora de reacción cuando la cantidad de solución (agua + ácido) es la necesaria para destilar y cuando se agrega un poco más de lo necesario la reacción no se lleva a cabo porque en el destilado sólo se obtiene agua y ácido y finalmente, el material termina por quemarse.

Según el análisis de varianza el tipo de materia prima sí influye en la cantidad de furfural al obtener. (Tablas No. XXI a XXVI de la sección Datos calculados).

Se concluye que al utilizar tusas de elote como materia prima se obtiene el mejor rendimiento de furfural, lo cual coincide con la hipótesis planteada y es lógico pues de los tres tipos de material las tusas son las que tienen el mayor porcentaje de pentosanos; el único inconveniente que presentan es su pre-tratamiento, pues como se escribió anteriormente debe cortarse en trozos bastante pequeños.

Independientemente del tipo de materia prima utilizado el H_2SO_4 es mejor catalizador que el HCl , para extraer furfural de material vegetal.

Para determinar si el compuesto obtenido es furfural, se le realizó la prueba de la anilina la cual consiste en agregar a la muestra contenida en un tubo de ensayo, 2 ml de una solución de acetato de fenilamonio que es una solución de anilina y ácido acético, al adicionar acetato de fenilamonio a la muestra esta se torna de color rojo con lo que se concluye que sí es furfural.

El furfural recién destilado es de color amarillo pardo, pero al estar en contacto con el aire y la luz adquiere un color amarillo intenso, tiene olor a almendras.

CONCLUSIONES

1. El furfural se obtiene de las tusas de elote, bagazo de caña y cascarilla de cebada al reaccionar en caliente con una solución de ácido más agua.
2. De los tres tipos de material analizados las tusas de elote son las que producen el mayor rendimiento de furfural.
3. Desde el punto de vista de facilidad del proceso, la cascarilla de cebada es la que presenta el tamaño de partícula óptimo y es el material que utiliza la menor cantidad de catalizador.
4. El H_2SO_4 es mejor catalizador que el HCl , en la reacción de conversión pentosanos a furfural, porque no solo aumenta la velocidad de reacción, sino también es más económico.

RECOMENDACIONES

1. Utilizar otros tipos de desechos agroindustriales, como: cascarilla de arroz, de café, etc. para determinar si de estos puede extraerse furfural y si hay producción cual es el porcentaje de rendimiento.
2. Al extraer furfural, de material vegetal, debe usarse un desecho agroindustrial que sea abundante en esa época del año, para asegurarse que el aprovisionamiento sea suficiente y la calidad de la materia prima satisfactoria.
3. Conociendo los resultados de la obtención de furfural a partir de la cascarilla de cebada, bagazo de caña y tusas de elote a nivel de laboratorio, experimentar la producción a nivel de la planta piloto para después continuar con la producción industrial y en el futuro poder exportar este producto.
4. Investigar que otro tipo de catalizadores pueden utilizarse en la reacción para convertir los pentosanos del material vegetal en furfural.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. **Fabricación y comercialización de furfural (GATT) valorización de desechos agroindustriales.** (Ginebra: Centro de Comercio Internacional, 1978), pp 1-126.
2. René Arias Barrios y Gilmar Tronconi. **Obtención de furfural a partir de cascarilla de algodón, café y arroz.** (Guatemala: Dirección General de Investigaciones, Universidad San Carlos de Guatemala, Centro Universitario del Sur, 1992), pp 40 – 41.
3. Robert Morrison y Robert Boyd. **Química orgánica.** (Estados Unidos: Editorial Addison – Wesley Iberoamericana, 1990), pp 1189.

BIBLIOGRAFÍA

1. DROGUETT, Sergio. **Monografía: Elementos de catálisis heterogénea.** Washington: se, 1983.
2. FLORES, Silverio. **Manual de caña de azúcar.** Guatemala: se, sa.
3. GILCHRIST, T. L. **Química heterocíclica.** Segunda Edición. sl: Editorial Addison – Wesley Iberoamericana, 1992.
4. HOLLAND, Charles. **Fundamentos de destilación de mezclas multicomponentes.** sl: Editorial Limusa, sa.
5. MONTGOMERY, Douglas. **Diseño y análisis de experimentos.** México: Grupo Editorial Iberoamérica, 1991.
6. MORRISON, Robert. Boyd, Robert. **Química orgánica.** Estados Unidos: Editorial Addison – Wesley Iberoamericana, 1990.

7. PERRY, John. **Manual del ingeniero químico**. Sexta edición. México: Editorial Mc Graw Hill, 1986.

8. TEGEDER, Fritz y Ludwing Mayer. **Métodos de la industria química**. España: Editorial Reverté S.A, 1975.

9. WILSON, H.K. y A.C. Rocher. **Producción de cosechas**. México: se, 1988.

APÉNDICE

Datos originales

Tabla No. VI: Cantidad de furfural obtenido según el tipo de tratamiento

Número	Tratamiento	Repeticiones (Cant. De furfural en ml)		
		1	2	3
1	P1M1C1	1.1	1.4	1.3
2	P1M1C2	1	1	0.9
3	P2M1C1	0.5	0.6	0.6
4	P3M1C2	1.1	1	1
5	P2M1C2	0.5	0.4	0.4
6	P3M2C2	1	1.2	1.2
7	P2M2C2	1.1	1	1
8	P1M2C1	1.8	1.5	1.6
9	P2M2C1	1	1.2	1.2
10	P2M3C2	0.1	0	0.09
11	P2M3C1	0.2	0.1	0.1
12	P1M3C1	0	0	0
13	P3M3C2	0.4	0.5	0.4
14	P3M1C1	1.4	1.3	1.4
15	P1M2C2	1.1	1.2	1
16	P1M3C2	0	0	0
17	P3M3C1	0.4	0.4	0.3
18	P3M2C1	2.5	2.2	2.3

Tabla No. VII: Cantidades de agua y ácido usados en solución, según la cantidad de cascarilla de cebada

Cant. Cascarilla de cebada (g)	Cantidad de agua (ml)	Cantidad de H2SO4 (ml)	Cantidad de HCl (ml)
20	142	28	28
40	284	56	56
80	320	63	63

Tabla No. VIII: Cantidades de agua y ácido usados en solución, según la cantidad de bagazo de caña

Cant. De bagazo de caña (g)	Cantidad de agua (ml)	Cantidad de H2SO4 (ml)	Cantidad de HCl (ml)
20	213	42	42
40	426	84	84
80	380	75	75

Tabla No. IX: Cantidades de agua y ácido usados en solución, según la cantidad de tusas de elote

Cant. De tusas de elote (g)	Cantidad de agua (ml)	Cantidad de H₂SO₄ (ml)	Cantidad de HCl (ml)
20	284	56	56
40	440	87	87
80	568	112	112

Cálculo de muestra

1. Cálculo de rendimiento de furfural

$$\% \text{ Rendto.} = \frac{\text{Cant. furfural promedio}}{\text{Cant. Materia prima}} \times 100$$

$$\text{Cant. de furfural promedio} = \frac{\text{Cant. de furfural de c/repetición}}{\# \text{ repeticiones}}$$

Cálculo de rendimiento para la corrida #2 (P1M1C2)

- Según los datos originales (Tabla No. V), las cantidades de furfural para las repeticiones 1, 2, y 3 de la corrida 2 son: 1, 1 y 0.9 ml; respectivamente, para una cantidad de 40 g de materia prima

$$\% \text{ Rendto.} = \frac{(1 + 1 + 0.9) / 3}{40} \times 100$$

$$\% \text{ Rendto.} = 2.42\%$$

El porcentaje de rendimiento, para las corridas restantes se presenta en la sección de datos calculados.

2. **Análisis de varianza:** para determinar si influye la cantidad de cascarilla de cebada en el rendimiento de furfural, al usar HCl como catalizador.

- Hacer una tabla: con el tipo de tratamiento, número de repeticiones variables de respuesta:

Tabla No. X: Análisis de varianza

TRATAMIENTO	REPETICIONES			Yi	Yip
P1M1C1	1 ml	1 ml	0.9 ml	2.9	0.9667
P1M2C2	1.8 ml	1.5 ml	1.6 ml	4.9	1.6333
P1M3C2	0	0	0	0	0
TOTAL				7.8	2.60

Donde:

$$Y_i = \sum (\text{de los ml de furfural de cada repetición})$$

$$Y_{ip} = Y_i / \# \text{ de repeticiones}$$

- Cálculo de los grados de libertad (GL), la suma de cuadrados (SS_T), la suma de cuadrados medios, para obtener F_c y compararlo con F_t . Ordenar los resultados en una tabla, como se muestra a continuación:

$$SS_T = 1^2 + 1^2 + 0.9^2 + 1.8^2 + 1.5^2 + 1.6^2 - (7.8)^2/9 = 4.10$$

$$SS_{\text{trat}} = \frac{2.9^2}{3} + \frac{4.9^2}{9} - \frac{7.8^2}{9} = 4.04667$$

$$\text{Error} = 4.10 - 4.04667 = 0.05333$$

Tabla No. XI: Resumen de análisis de varianza

FUENTE DE VARIACIÓN	SUMA DE CUADRADOS	GRADOS DE LIBERTAD	MEDIA DE CUADRADOS	Fc
SS _{trat}	4.04667	2	2.02333	227.625
ERROR	0.53333	6	0.00888	
TOTAL	4.10	8		

Según Tabla No. IV , Ref. 4. el valor de Ft es 10.92.

$F_c > F_t$, por lo que la cantidad de materia prima si influye en el experimento.

Se sigue un procedimiento similar para el análisis de varianza de las otras corridas.

Datos calculados

Tabla No. XII: Rendimiento de furfural al usar tres diferentes cantidades de tusas de elote

Masa	Rendimiento usando	Rendimiento usando
	C1	C2
20	2.35%	2.17%
40	3.42%	2.58%
80	2.91%	1.41%

Tabla No. XIII : Rendimiento de furfural al usar tres cantidades diferentes de bagazo de caña

Masa	Rendimiento usando	Rendimiento usando
	C1	C2
20	0.67%	0.32%
40	1.42%	1.08%
80	1.42%	1.29%

Tabla No. XIV : Rendimiento de furfural al usar tres diferentes cantidades de cascarilla de cebada

Masa	Rendimiento usando C1	Rendimiento usando C2
20	0	0
40	3.17%	2.42%
80	2.04%	1.38%

Tabla No. XV Análisis de varianza para determinar si influye la cantidad de cascarilla de cebada, en la producción de furfural al usar H₂SO₄ como catalizador

Tratamiento	Yi	Yip
P1M1C2	3.80	1.27
P1M2C2	4.90	1.63
P1M3C2	0	0
TOTAL	8.70	

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de	Media de cuadrados	Fc
Porcentaje	4.047	1	4.50	195.62
Error	0.093	4	0.023	
Total	4.50	8		

Tabla No. XVI: Análisis de varianza para determinar si influye la cantidad de cascarilla de cebada, en la producción de furfural al usar HCl como catalizador

Tratamiento	Yi	Yip
P1M1C2	2.90	0.9667
P1M2C2	4.90	1.6333
P1M3C2	0	0
TOTAL	7.80	2.60

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de lib.	Medla de cuadrados	Fc
Porcentaje	4.0466	2	2.0233	227.625
Error	0.5333	6	0.0088	
Total	4.10	8		

Tabla No. XVII: Análisis de varianza para determinar si influye la cantidad de bagazo de caña al usar H₂SO₄ como catalizador, en la producción de furfural

Tratamiento	Yi	Yip
P2M1C1	1.70	0.5667
P2M2C1	3.40	1.1333
P2M3C1	0.40	0.1333
TOTAL	5.50	1.8333

Fuente de Variación	Suma de cuadrados	Grados de Lib.	Media de cuadrados	Fc
Porcentaje	1.5088	2	0.7544	43.90
Error	0.0399	6	0.00665	
Total	1.5488	8		

Tabla No. XVIII: Análisis de varianza para determinar si influye la cantidad de bagazo de caña en la producción de furfural, al usar HCl como catalizador

Tratamiento	Yi	Yip
P2M1C2	1.3	0.4333
P2M2C2	3.1	1.0333
P2M3C2	0.19	0.0633
TOTAL	4.52	

FUENTE DE VARIACION	SUMA DE CUADRADOS	GRADOS DE LIB.	MEDIA DE CUADRADOS	Fc
PORCENTAJE	1.508056	2	0.754028	22.62
ERROR	0.02	6	0.033333	
TOTAL	1.508056	8		

Tabla No. XIX: Análisis de varianza para determinar si influye la cantidad de tusas de elote en la producción de furfural, al usar H₂SO₄ como catalizador

Tratamiento	Yi	Yip
P3M1C1	4.10	1.366
P3M2C1	7.00	2.333
P3M3C1	1.40	0.466
TOTAL	12.50	4.166

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de	Media de cuadrados	Fc
Porcentaje	5.2288	2	2.6144	261.44
Error	0.0599	6	0.0099	
Total	5.2888	8		

Tabla No. XX: Análisis de varianza para determinar si influye la cantidad de tusas de elote en la producción de furfural, al usar HCl como catalizador

Tratamiento	Yi	Yip
P3M1C2	3.10	1.033
P3M2C2	3.40	1.133
P3M3C2	1.30	0.433
TOTAL	7.80	

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de Lib.	Media de cuadrados	Fc
Porcentaje	0.86	2	0.43	64.5
Error	0.04	6	0.0066	
Total	0.90	8		

Tabla No. XXI: Análisis de varianza para determinar si influye el tipo de material en la producción de furfural, al usar H₂SO₄ como catalizador

Tratamiento	Yi	Yip
P1M1C1	3.80	1.26
P2M1C1	1.70	0.56
P3M1C1	4.10	1.36
TOTAL	9.60	3.20

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de Lib.	Media de cuadrados	Fc
Porcentaje	1.14	2	0.57	57
Error	0.06	6	0.01	
Total	1.20	8		

Tabla No. XXII: Análisis de varianza para determinar si influye el tipo de material en la producción de furfural, al usar H₂SO₄ como catalizador

Tratamiento	Yi	Yip
P1M2C1	4.90	1.63
P2M2C1	3.40	1.13
P3M1C1	7.00	2.33
TOTAL	15.30	5.10

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de Lib.	Media de cuadrados	Fc
Porcentaje	20.2522	2	10.1261	27.67
Error	2.1800	6	0.3633	
TOTAL	22.4322	8		

Tabla No. XXIII: Análisis de varianza para determinar si influye el tipo de material en la producción de furfural, al usar H₂SO₄ como catalizador

Tratamiento	Yi	Yip
P1M3C1	0	0
P2M3C1	0.40	0.133
P3M3C1	1.30	0.433
TOTAL	1.70	0.566

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de Lib.	Media de cuadrados	Fc
Porcentaje	0.2955	2	0.1477	66.5
Error	0.0133	6	0.0022	
Total	0.3080	8		

Tabla No. XXIV: Análisis de varianza para determinar si influye el tipo de material en la producción de furfural, al usar HCl como catalizador

Tratamiento	Yi	Yip
P1M1C2	2.90	0.967
P2M1C2	1.13	0.377
P3M1C2	3.10	1.033
TOTAL	7.13	

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de Lib.	Media de cuadrados	Fc
Porcentaje	0.7873	2	0.3916	14.90
Error	0.1577	6	0.2628	
Total	0.9414	8		

Tabla No. XXV: Análisis de varianza para determinar si influye el tipo de material en la producción de furfural, al usar HCl como catalizador

Tratamiento	Yi	Yip
P1M2C2	3.30	1.100
P2M2C2	3.10	1.033
P2M2C2	3.40	1.133
TOTAL	9.80	

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de Lib.	Media de cuadrados	Fc
Porcentaje	0.1155	2	0.05775	12.99
Error	0.0266	6	0.0044	
Total	0.1422	8		

Tabla No. XXVI: Análisis de varianza para determinar si influye el tipo de material en la producción de furfural, al usar HCl como catalizador

Tratamiento	Yi	Yip
P1M3C2	0	0
P2M3C2	0.19	0.063
P3M3C2	1.30	0.433
TOTAL	1.49	

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de Lib.	Media de cuadrados	Fc
Porcentaje	0.3286	2	0.1643	77.44
Error	0.0127	6	0.00212	
Total	0.3414	8		

Tabla No. XXVII: Análisis de varianza para determinar si influye el tipo de catalizador en la producción de furfural, al usar tusas de elote como materia prima

Tratamiento	Yi	Yip
P3M1C1	4.00	1.333
P3M1C2	3.10	1.033
TOTAL	7.10	

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de Lib.	Media de cuadrados	Fc
Porcentaje	0.135	1	0.135	16.20
Error	0.033	4	0.00833	
Total	0.168	5		

Tabla No. XXVIII: Análisis de varianza para determinar si influye el tipo de catalizador en la producción de furfural, al usar tusas de elote como materia prima

TRATAMIENTO	Y _i	Y _{ip}
P3M2C1	7.00	2.33
P3M2C2	3.40	1.13
TOTAL	10.40	

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de Lib.	Media de cuadrados	F _c
Porcentaje	2.233	1	2.233	121.82
Error	0.073	4	0.0183	
Total	2.233	5		

Tabla No. XXIX: Análisis de varianza para determinar si influye el tipo de catalizador en la producción de furfural, al usar tusas de elote como materia prima.

Tratamiento	Yi	Yip
P3M3C1	1.10	0.366
P3M3C2	1.30	0.433
TOTAL	2.40	

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de Lib.	Media de cuadrados	Fc
Porcentaje	0.0219	1	0.0219	20.85
Error	0.0042	4	0.00105	
Total	0.0261	5		

Tabla No. XXX: Análisis de varianza para determinar si influye el tipo de catalizador en la producción de furfural, al usar bagazo de caña como materia prima.

TRATAMIENTO	Yi	Yip
P2M1C1	1.70	0.567
P2M1C2	1.30	0.433
TOTAL	3.00	

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de Lib.	Media de cuadrados	Fc
Porcentaje	0.0266	1	0.0266	8.079
Error	0.0133	4	0.0033	
Total	0.0400	5		

Tabla No. XXXI: Análisis de varianza para determinar si influye el tipo de catalizador en la producción de furfural, al usar bagazo de caña como materia prima.

Tratamiento	Yi	Yip
P2M2C1	3.40	1.133
P2M2C2	3.10	1.033
TOTAL	6.50	

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de Lib.	Media de cuadrados	Fc
Porcentaje	0.03333	1	0.015	1.80
Error	0.015	4	0.00833	
Total	0.04833	5		

Tabla No. XXXII: Análisis de varianza para determinar si influye el tipo de catalizador en la producción de furfural, al usar bagazo de caña como materia prima.

Tratamiento	Yi	Yip
P2M3C1	0.50	0.167
P2M3C2	0.19	0.063
TOTAL	0.69	

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de Lib.	Media de cuadrados	Fc
Porcentaje	0.01600	1	0.01600	50.26
Error	0.01275	4	0.003183	
Total	0.02875	5		

Tabla No. XXXIII: Análisis de varianza para determinar si influye el tipo de catalizador en la producción de furfural, al usar cascarilla de cebada como materia prima

Tratamiento	Yi	Yip
P1M1C1	3.80	1.2667
P1M1C2	2.90	0.9667
TOTAL	6.70	

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de Lib.	Media de cuadrados	Fc
Porcentaje	0.135	1	0.135	10.125
Error	0.053	4	0.013	
Total	1.188	5		

Tabla No. XXXIV: Analisis de varianza para determinar si influye el tipo de catalizador en la produccion de furfural, al usar cascarilla de cebada como materia prima

Tratamiento	Yi	Yip
P1M2C1	4.90	1.6333
P1M2C2	3.30	1.10
TOTAL	8.20	

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de Lib.	Media de cuadrados	Fc
Porcentaje	0.42667	1	0.42667	25.60
Error	0.06667	4	0.01667	
Total	0.49333	5		