

**DISEÑO PRELIMINAR DE UN PROCESO DE OBTENCIÓN DE ETANOL A
PARTIR DE MATERIAL LIGNOCELULÓSICO DE FRUTAS, APLICANDO LA
TECNOLOGÍA DE HIDRÓLISIS TÉRMICA CATALIZADA**

DIANA CAROLINA RUEDA MARTÍN

WILLIAM JOSÉ HERRERA HERNÁNDEZ

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2006

**DISEÑO PRELIMINAR DE UN PROCESO DE OBTENCIÓN DE ETANOL A
PARTIR DE MATERIAL LIGNOCELULÓSICO DE FRUTAS, APLICANDO LA
TECNOLOGÍA DE HIDRÓLISIS TÉRMICA CATALIZADA**

DIANA CAROLINA RUEDA MARTÍN

WILLIAM JOSÉ HERRERA HERNÁNDEZ

**Trabajo de grado para optar el título de
Ingeniero Químico**

Director

**PROFESOR GUILLERMO RUEDA RUEDA
Ingeniero Químico**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2006

RESUMEN

TÍTULO: DISEÑO PRELIMINAR DE UN PROCESO DE OBTENCIÓN DE ETANOL A PARTIR DE MATERIAL LIGNOCELULÓSICO DE FRUTAS, APLICANDO LA TECNOLOGÍA DE HIDRÓLISIS TÉRMICA CATALIZADA*

AUTORES: Diana Carolina Rueda Martín**
William José Herrera Hernández**

PALABRAS CLAVES: Biomasa, Pre-tratamiento, Etanol, Hidrólisis ácida

DESCRIPCIÓN:

El desarrollo de este proyecto se fundamentó en la continuidad de un proceso para el tratamiento integral de los residuos sólidos orgánicos, los cuales son un subproducto de las actividades del hombre; éstos aumentan en cantidad y variedad de manera proporcional al incremento de la población y del desarrollo industrial.

Dentro de este contexto, se da una visión del proceso de hidrólisis y el de fermentación de azúcares, originados en las cáscaras de frutas para la producción de etanol.

El objetivo principal fue diseñar un proceso preliminar para la obtención de etanol a partir de material lignocelulósico de las cáscaras de frutas provenientes de la "Plaza de Mercado Guarín" de la ciudad de Bucaramanga, haciendo en primer lugar, una revisión bibliográfica de las tecnologías existentes para la producción de etanol usando este tipo de material, seleccionando un proceso en tres etapas: primera, se realizó un pretratamiento con ácido diluido e hidrólisis con ácido concentrado a alta temperatura; segunda, fermentación con *Saccharomyces Cerevisiae* y tercera, separación/purificación aplicando una destilación simple.

Después de seleccionada la tecnología, se implementó el desarrollo experimental para cada etapa. El análisis de varianza (ANOVA) se realizó con el paquete estadístico STATGRAPHICS 5.1 (*versión demo*), utilizando los datos de los diseños experimentales que se necesitaron para estimar los efectos de los factores categóricos con dos niveles de operación para cada uno.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Químicas, Escuela de Ingeniería Química,
Director Ingeniero Químico Guillermo Rueda Rueda

ABSTRACT

TITLE: PRELIMINARY DESIGN OF A PROCESS FOR OBTAINING ETHANOL FROM LIGNOCELLULOSIC MATERIAL OF FRUIT, APPLYING THE TECHNOLOGY OF CATALYZED THERMAL HYDROLYSIS*

AUTHORS: Diana Carolina Rueda Martín**
William José Herrera Hernández**

KEY WORDS: Biomass, Pre- treatment, Ethanol, Acid Hydrolysis.

DESCRIPTION:

The development of this Project was based in the continuity of a process for the whole treatment of the organic solid residues which are a by-product of the man's activities. These residues increase in quantity and variety in a proportional way to the population's increment and of the industrial development.

Inside this context, a vision of the hydrolysis process in give and that of fermentation of sugars, originated in the shells of fruits for the production of ethanol.

The main objective was to design a preliminary process for the obtaining of ethanol starting from lignocelulosic material of the shells of fruits coming from "Plaza de Mercado Guarín" of the city of Bucaramanga, making in the first place, a bibliographical revision of the existent technologies for the production of ethanol using this material type, selecting a process in three stages: First, it was carried out a pre-treatment with dissolved acid and hydrolysis with concentrated acid to high temperature; Second, fermentation with *Saccharomyces Cerevisiae* and Third, separation/purification applying a simple distillation.

After having selected the technology, the experimental development was implemented for each stage. The variance analysis (ANOVA) was carried out with the statistical package STATGRAPHICS 5.1 (Demo version), using the data of the experimental designs that were needed to estimate the effects of the categorical factors with two operation levels for each one.

* Grade Work

** College of Engineering's Physique Chemicals, School of Chemical Engineering,
Director Chemical Engineer Guillermo Rueda Rueda

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	12
1 CONCEPTOS GENERALES	15
1.1 CARACTERÍSTICAS DE LAS CÁSCARAS DE FRUTAS	15
1.1.1 COMPOSICIÓN FÍSICA	15
1.1.2 COMPOSICIÓN QUÍMICA	16
1.1.2.1 Celulosa	17
1.1.2.2 Hemicelulosa	17
1.1.2.3 Lignina	17
1.2 ESTADO DE LA GENERACIÓN DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS ORGÁNICOS EN LA CIUDAD DE BUCARAMANGA	18
1.3 ALCOHOL ETÍLICO O ETANOL	19
1.3.1 GENERALIDADES DEL ETANOL	20
1.3.1.1 Definición	20
1.3.1.2 Propiedades	20
1.3.1.3 Usos	20
1.4 TECNOLOGÍAS DISPONIBLES PARA LA PRODUCCIÓN DE ETANOL A PARTIR DE MATERIALES LIGNOCELULÓSICOS	21
1.4.1 SACARIFICACIÓN Y FERMENTACIÓN SIMULTÁNEA (SFS)	21
1.4.2 HIDRÓLISIS CON ÁCIDO DILUÍDO. NEUTRALIZACIÓN Y FERMENTACIÓN	23
1.4.3 HIDRÓLISIS CON ÁCIDO CONCENTRADO. RECUPERACIÓN DEL ÁCIDO Y FERMENTACIÓN	24
1.5 MICROORGANISMOS UTILIZADOS EN LA PRODUCCIÓN DE ETANOL	26
1.5.1 Zimomonas mobilis	26

1.5.2	Saccharomyces Cerevisiae	26
2	DISEÑO PRELIMINAR, MONTAJE Y OPERACIÓN DE UN PROCESO DE OBTENCIÓN DE ETANOL A PARTIR DE MATERIAL LIGNOCELULÓSICO DE FRUTAS	27
2.1	GENERALIDADES DEL PROCESO	27
2.1.1	SELECCIÓN, CARACTERIZACIÓN Y PRETRATAMIENTO DEL SUSTRATO	28
2.1.1.1	Materia prima	28
2.1.1.2	Sección de molienda.....	29
2.1.1.3	Sección de hidrólisis del material lignocelulósico.....	32
2.1.2	FERMENTACIÓN DEL SUSTRATO	34
2.1.3	SEPARACIÓN Y PURIFICACIÓN DEL SUSTRATO FERMENTADO	36
2.1.3.1	Sección de separación.....	36
2.1.3.2	Sección de Destilación.....	36
3	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	38
3.1	CARACTERIZACIÓN INICIAL DEL EFECTO DE LAS VARIABLES DE PROCESO SOBRE LOS °BRIX	38
3.2	DETERMINACIÓN DEL EFECTO DE LA TEMPERATURA Y TIEMPO DE RETENCIÓN SOBRE LA HIDRÓLISIS DEL MATERIAL LIGNOCELULÓSICO EN UN REACTOR BATCH	39
3.3	EFECTO DEL TIEMPO DE FERMENTACIÓN Y DE LA TEMPERATURA EN LA PRODUCCIÓN DE ETANOL	40
3.4	PERSPECTIVAS DE FUTURO PARA LA PRODUCCIÓN DEL ETANOL A PARTIR DE MATERIAL LIGNOCELULÓSICO DE FRUTAS	41
3.5	ANÁLISIS ECONÓMICO	42
	CONCLUSIONES	44
	RECOMENDACIONES	46
	BIBLIOGRAFÍA	47

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1.1 Esquema general de los componentes químicos de los materiales lignocelulósicos.....	16
Figura 1.2 Producción de alcohol a partir de biomasa lignocelulósica. SSF: fermentación y sacarificación simultáneas.....	22
Figura 1.3 Hidrólisis con ácido diluído. Neutralización y fermentación.....	23
Figura 1.4 Hidrólisis con ácido concentrado. Recuperación del ácido y fermentación.	24
Figura 2.1 Esquema general de las etapas del desarrollo experimental.....	28
Figura 2.2 Recolección de los residuos de frutas en plazas de mercado y expendios de frutas de la ciudad.	29
Figura 2.3 Determinación del efecto del tamaño de partícula.	30
Figura 2.4 Molino para reducción de tamaño de partícula a 6 mm.....	31
Figura 2.5 Licuadora para reducción de tamaño de partícula entre 2-3 mm	31
Figura 2.6 Reactor Batch para hidrólisis térmica catalizada con chaqueta de calentamiento. Capacidad 20 L.....	33
Figura 2.7 Reactor Batch de fermentación con serpentín para calentamiento. Capacidad 20 L.....	35
Figura 2.8 Equipo de destilación simple. Capacidad 8 L.....	36
Figura 2.9 Equipo de destilación simple. Capacidad 50 mL.....	36
Figura 2.10 Diagrama PFD de la etapa de diseño preliminar de un proceso de obtención de etanol a partir de material lignocelulósico de cáscaras de frutas.	37

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1.1 Composición física de los residuos de frutas.....	15
Tabla 1.2 Producción diaria de residuos sólidos de los principales departamentos y capitales (toneladas/día)	19
Tabla 1.3 Propiedades fisicoquímicas del etanol.....	20
Tabla 2.1 Composición física de los RSO generados en la plaza de mercado	29
Tabla 2.2 Caracterización fisicoquímica aproximada del sustrato después de la reducción de tamaño.	31
Tabla 2.3 Composición general del sustrato	32
Tabla 2.4 Composición del sustrato según su naturaleza biodegradable.....	32
Tabla 2.5 Variables de proceso empleadas en el diseño experimental en la etapa de hidrólisis	34
Tabla 2.6 Variables de proceso empleadas en el diseño experimental en la etapa de fermentación	36
Tabla 3.1 Análisis de varianza para °Brix – Diseño Factorial 2 ⁵	38
Tabla 3.2 Resumen y base del diseño experimental	39
Tabla 3.3 Resumen y base del diseño experimental	40
Tabla 3.4 Análisis de varianza para °Brix – Diseño Factorial 2 ²	40
Tabla 3.5 Resumen y base del diseño experimental	40
Tabla 3.6 Resultados del diseño experimental	41

LISTADO DE ANEXOS

ANEXO A. MÉTODOS GENERALES Y CONSTITUYENTES BÁSICOS PARA EL ANÁLISIS DE ALIMENTOS.....	50
ANEXO B SACCHAROMYCES CEREVISIAE	52
ANEXO C. DIAGRAMA DE FLUJO PARA EL DESARROLLO DEL PROCESO EN PLANTA PILOTO.....	53
ANEXO D. EXPECIFICACIONES DE LOS EQUIPOS PARA ADECUACIÓN DE LA MATERIA PRIMA.....	54
ANEXO E EVALUACIÓN ECONÓMICA PRELIMINAR DEL PROCESO DE OBTENCIÓN DE ETANOL A PARTIR DE MATERIAL LIGNOCELULÓSICO DE CÁSCARAS DE FRUTAS.....	59
ANEXO F RESULTADOS OBTENIDOS PARA CADA UNO DE LOS DISEÑOS EXPERIMENTALES	64

INTRODUCCIÓN

Los residuos sólidos orgánicos son el subproducto de actividades imprescindibles del hombre y se han generado desde los inicios de la humanidad. Cada día aumentan en cantidad y variedad de manera proporcional al incremento de la población humana y del desarrollo tecnológico e industrial. Su disposición final e incorrecta ha ocasionado grandes inconvenientes al medio ambiente, contaminando agua, aire y suelo. Actualmente se ha creado conciencia de la magnitud de este fenómeno, no haciéndose esperar la pronta búsqueda de soluciones.

Desde tiempo atrás se han venido desarrollando tratamientos para los desechos orgánicos, que hoy en día se conocen como convencionales y parte de éstos son procesos susceptibles de transformaciones. En el país, hace casi cuatro años atrás, la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios advirtió sobre el manejo y disposición final de estos residuos: “Actualmente se está cocinando una crisis sanitaria debido a la mala disposición de estos desechos”. Además, a raíz de la entrada en vigencia de los PGIRS¹, y ACODAL² alertan a municipios al manejo de basuras, haciendo un *llamado para que las tecnologías usadas para el manejo de las basuras sean las apropiadas para cada región*.

Aunque algunas entidades territoriales están tomando previsiones, se agota la vida útil de los sitios de destino final de los residuos sólidos y, en algunas capitales, el asunto ha desbordado los límites.

¹ Planes de Gestión Integral de Residuos Sólidos

² La Asociación Colombiana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental (ACODAL)

Actualmente en la ciudad de Bucaramanga se realiza la disposición de gran parte de los desechos orgánicos en el relleno sanitario “El Carrasco”. Es importante tener en cuenta que la acumulación de estos residuos conlleva a la generación de contaminantes que causan impacto en el ecosistema.

Diariamente se generan en las plazas de mercado de la ciudad aproximadamente cuarenta toneladas de residuos sólidos orgánicos³. El manejo inadecuado de los productos (verduras, frutas y hortalizas, etc.) causa pérdidas y genera una gran cantidad de residuos que generalmente se procesan para la obtención de compost. Los residuos provenientes de las plazas de mercado pueden ser aprovechados en la obtención de otros subproductos que tengan un mayor valor agregado.

A nivel mundial el tratamiento de desechos orgánicos está orientado a la generación de energía y obtención alternativa de productos derivados del petróleo⁴. El aprovechamiento de la biomasa como fuente de energía ofrece un amplio rango de beneficios ambientales: mitiga el efecto invernadero, reduce la lluvia ácida, previene la erosión de los suelos y la contaminación de las fuentes de agua, enriquece el hábitat de la vida silvestre y ayuda a mantener la salud humana y la estabilidad de los ecosistemas.

Dentro de este contexto existen organizaciones como El Laboratorio de Frutas Cítricas y Productos Subtropicales, del Servicio de Investigación Agrícola (ARS) de Estados Unidos, el cual desarrolla investigaciones, cuyo propósito es obtener etanol a partir de los residuos de frutas cítricas (naranja, limón, mandarina, maracuyá, piña, etcétera)⁵.

³ Empresa de Aseo de Bucaramanga EMAB S.A. E.S.P.

⁴ FOCER, Fortalecimiento de la capacidad en energía renovable para América Central. Manuales sobre energía renovable: Biomasa/ Biomass. Costa Rica 2002

⁵ “Obtención de etanol a partir de las cáscaras de las frutas cítricas”. Periódico El Tiempo. Sabado 15 de Abril de 2006. Colombia / <http://www.ars.usda.gov/is/ar/archive/apr06/citrus0406.htm>

Es por esto que se propone desarrollar un proceso que permita realizar un tratamiento físico-químico del material lignocelulósico de frutas producido en “La Plaza de Mercado Guarín”, de la ciudad de Bucaramanga, con el fin de obtener un producto de valor agregado y la disposición final de los lodos activados, de forma que tengan aplicación como materia complementaria a otro proceso.

Para tratar los residuos sólidos orgánicos se plantea desarrollar un diseño preliminar para un proceso de producción de etanol a partir de las cáscaras de frutas, realizando en primer lugar una revisión bibliográfica de las tecnologías existentes para la producción de alcohol a partir de material lignocelulósico, y posteriormente la selección e implementación de una de éstas para su estudio.

Finalmente, en este proyecto se da una visión general del proceso de hidrólisis y fermentación de azúcares provenientes de la holocelulosa de las cáscaras de frutas, como una alternativa para la futura producción de etanol.

1 CONCEPTOS GENERALES

1.1 CARACTERÍSTICAS DE LAS CÁSCARAS DE FRUTAS

Dentro de la materia prima de la industria alimentaria, las frutas y los vegetales, son los que mayores residuos sólidos orgánicos (RSO) generan. Éstos se caracterizan por estar compuestas de un conjunto de azúcares, ácidos orgánicos, sustancias colorantes, proteínas, aceites, vitaminas y material lignocelulósico. Cabe señalar, que los residuos de frutas se constituyen principalmente por cáscaras de naranja, piña, patilla, papaya y banano, por ser éstas las que se encuentran en mayor proporción. Estudios recientes que cuentan con el soporte de la práctica industrial, demuestran la viabilidad de satisfacer las demandas de biocombustibles a partir de los RSO (Jackson, 2004). Por lo tanto, se puede decir que estos residuos constituyen una alternativa como materia prima de otros subproductos, aprovechando las propiedades biológicas, físicas y químicas que poseen.

1.1.1 COMPOSICIÓN FÍSICA

Se puede decir, que los residuos sólidos de frutas están constituidos por fibras, sólidos solubles e insolubles (Saha, B.C. 2004). A continuación se presenta la composición individual de las principales cáscaras que los componen:

Tabla 1.1 Composición física de los residuos de frutas

Cáscara	Datos* por 100 g de muestra					
	Agua [g]	Proteína [g]	Grasa [g]	Cenizas [g]	Fibra [g]	Carbohidratos [g]
Naranja	85	0,8	0,2	0,5	0,7	13,5
Piña	87,9	0,6	0,2	0,3	1,2	11
Patilla	90,5	0,5	0,1	0,4	---	8,5
Papaya	85,9	0,5	0,1	0,7	---	12,8
Banano	74,8	1,2	0,1	0,9	---	23

* <http://www.rlc.fao.org/bases/alimento/default.htm>

La fibra corresponde a la fracción orgánica insoluble en el agua que está presente en las cáscaras. Los sólidos solubles o grados Brix, forman la fracción que se disuelve en agua y se componen básicamente de azúcares y otras sustancias químicas.

1.1.2 COMPOSICIÓN QUÍMICA

Las cáscaras, al igual que todos los materiales lignocelulósicos, se componen de celulosa, hemicelulosa y lignina como principales polímeros naturales. Los frutos cítricos, además de los carbohidratos simples (fructosa, glucosa y sacarosa), también contienen polisacáridos no amiláceos (PNA), comúnmente conocidos como fibra dietética. La celulosa, hemicelulosa y lignina, está presente en un 25% a un 30% (Ecónomos, C. and Clay, W.D. Nutritional and health benefits of citrus fruits. Food Nutr. Agric. 1998; 24:11-18)

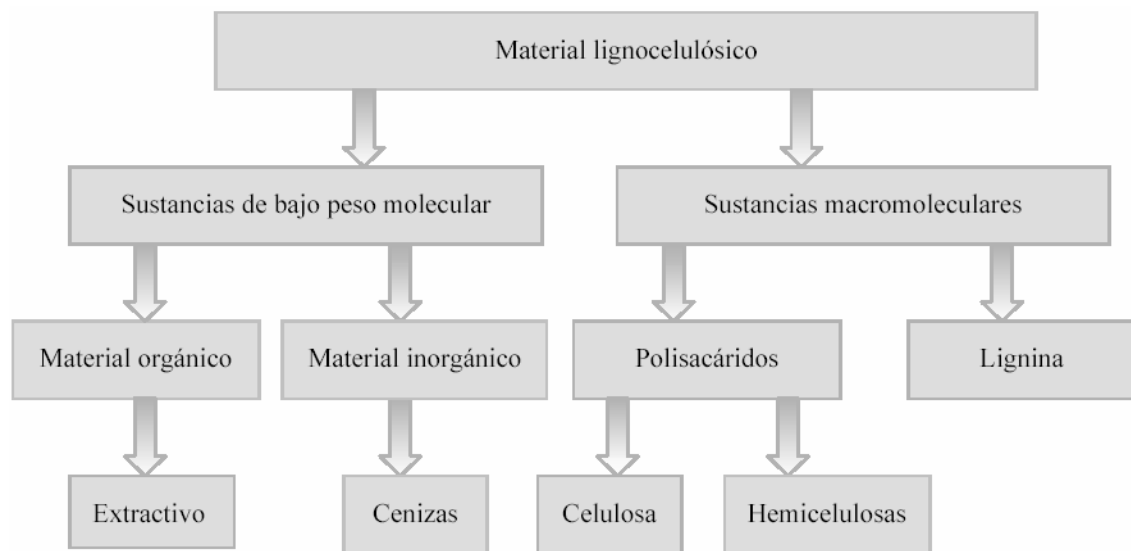


Figura 3.1 Esquema general de los componentes químicos de los materiales lignocelulósicos⁶.

⁶ Bárbara Pacheco, Claudia. Síntesis de carboximetilcelulosa (CMC) a partir de plantas anuales. Universitat Rovira i Virgili. Departamento de Ingeniería Química. Memoria para optar al grado de Doctor en Ing. Qca. Tarragona 2002

1.1.2.1 Celulosa

Químicamente la celulosa se define como un homopolímero de la D-glucosa. Se debe tener en cuenta, que los residuos de frutas se consideran como uno de los compuestos biológicos de naturaleza polimérica más abundante en la naturaleza. (Fengel, D., 1984; Echevenique, R.,1993). Las fibras de celulosa presentan dos regiones, a saber: **la región amorfa y la región cristalina**. La diferenciación de la celulosa en estas dos regiones permite reconocer la necesidad de realizar un pretratamiento a estos desechos con el objetivo de desestabilizar la región cristalina y lograr mayor grado de hidrólisis.

1.1.2.2 Hemicelulosa

La hemicelulosa es un polisacárido no celulósico, y posee un conjunto de características comunes como:

- Solubilidad en un solventes orgánico.
- Reactividad frente a un ácido.
- Descomposición en furfural y azúcares

La hemicelulosa es generalmente insoluble en agua, soluble en álcali, y más fácilmente hidrolizable en un ácido. Debido a la ausencia de cristalinidad, su bajo peso molecular y su configuración ramificada e irregular absorbe agua con facilidad. La simplicidad que presenta la hemicelulosa al ataque químico con respecto a la celulosa, la convierte en un factor de interés para la hidrólisis.

1.1.2.3 Lignina

Es el componente de naturaleza no polisacárida más abundante en las paredes celulares vegetales. Está formada por la extracción irreversible del agua de los azúcares, creando compuestos aromáticos.

La lignina es la tercera fracción mayoritaria de la biomasa lignocelulósica. Se trata de un polímero tridimensional amorfo formado por la polimerización deshidrogenativa de unidades de fenilpropano ligadas por diferentes tipos de enlaces que se alternan de manera desordenada. La lignina tiene una marcable tendencia a sufrir reacciones de autocondensación que dificultan su aislamiento sin presentar algún cambio (Sarkanen and Ludwig, 1971). Por tanto, la lignina no es un material de interés para la producción de azúcares, por lo cual es ideal, retirarla mediante la aplicación del pretratamiento de los residuos sólidos orgánicos.

1.2 ESTADO DE LA GENERACIÓN DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS ORGÁNICOS EN LA CIUDAD DE BUCARAMANGA

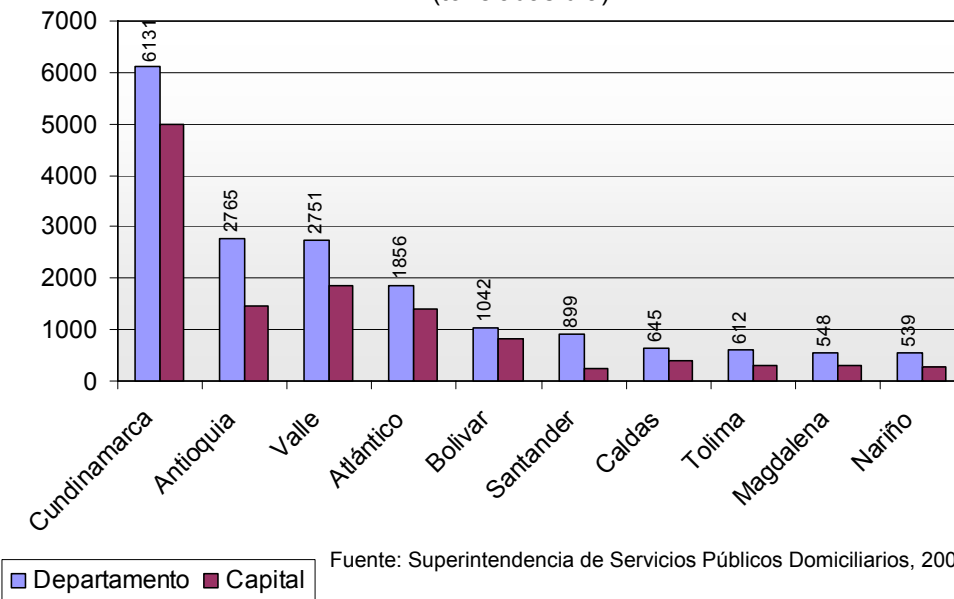
El inadecuado manejo de los residuos sólidos afecta el medio ambiente. Produce riesgos para la salud, deteriora los recursos naturales como el suelo, el aire y el agua; aumenta el peligro de incendios, y perjudica el aspecto estético del entorno. Además, genera condiciones favorables para la proliferación de insectos y roedores que actúan como vectores de enfermedades.

Es claro que las condiciones propias de la zona, como la alta industrialización, el comercio, las costumbres de la población orientadas al consumo de artículos desechables, la baja cultura de la recuperación, así como la concentración poblacional en la periferia urbana, hacen que una adecuada gestión de los residuos sólidos se convierta en una prioridad para la administración central.

Actualmente una fracción de los residuos sólidos orgánicos de frutas es acondicionada para su posterior transformación en abono. Este proceso se desarrolla en la planta de compostaje ubicada en la periferia del sitio de disposición final de residuos urbanos “El Carrasco”.

El diseño preliminar de un proceso de obtención de etanol, busca la utilización de estos residuos sólidos como materia prima, lo cual permite reducir los impactos negativos sobre la salud humana y el medio ambiente, promover la valorización y aprovechamiento de los residuos, y contribuir a la restauración y preservación del medio ambiente.

Tabla 1.2 Producción diaria de residuos sólidos de los principales departamentos y capitales (toneladas/día)



La ciudad de Bucaramanga genera aproximadamente 250 toneladas/día de residuos sólidos orgánicos, de los cuales un 20% de estos desechos se originan en las plazas de mercado y expendios de frutas de la ciudad.

1.3 ALCOHOL ETÍLICO O ETANOL

Los alcoholes, en general, son compuestos que tienen uno, dos o tres grupos hidróxido (-OH) enlazados a sus moléculas, por lo que se clasifican en monohidroxílicos, dihidroxílicos y trihidroxílicos respectivamente. El metanol y el etanol son alcoholes monohidroxílicos. Los alcoholes se caracterizan por la gran variedad de reacciones en las que intervienen, y la más importante es la reacción con los ácidos, en la que se forman los ésteres.

1.3.1 GENERALIDADES DEL ETANOL

1.3.1.1 Definición

El alcohol etílico forma parte del grupo de derivados químicos del carbono que contiene el grupo –OH. Posee solamente un grupo hidróxido, el cual se encuentra en un carbono enlazado con otro único carbono, por lo que se clasifica entre los alcoholes monohidroxílicos y primarios. Es el alcohol que se encuentra en bebidas como la cerveza, el vino y el brandy. Normalmente el etanol se concentra por destilación de soluciones diluídas. Desde la antigüedad, el etanol se ha obtenido por fermentación de azúcares.

1.3.1.2 Propiedades

El etanol es un líquido incoloro totalmente miscible con el agua, buen disolvente e inflamable. El etanol no reacciona con el agua ni con la mayoría de materiales comunes.

Tabla 1.3 Propiedades fisicoquímicas del etanol

Parámetro	Valor
Estado físico a 15 °C y 1atm	Líquido
Peso molecular	46.07
Punto de ebullición a 1atm	78.3 °C
Punto de congelación	-114°C
Temperatura crítica	243.1 °C
Presión crítica	63 atm
Viscosidad (20°C)	0.0141 poise
Punto de inflamación	14°C
Índice de refracción	1.3651

1.3.1.3 Usos

El alcohol etílico tiene dos grandes grupos de aplicación: el grupo de los solventes y el grupo de la química intermedia (Maxwell, 1995). El etanol producido a partir de la biomasa o de la fracción de residuos sólidos orgánicos, puede utilizarse como combustible por sí solo o en mezcla con los carburantes convencionales. En

recientes investigaciones se dice que éste tiene una enorme aplicabilidad como materia prima para el suministro de hidrógeno en celdas de combustible.

1.4 TECNOLOGÍAS DISPONIBLES PARA LA PRODUCCIÓN DE ETANOL A PARTIR DE MATERIALES LIGNOCELULÓSICOS⁷

Existe una variedad de tecnologías disponibles, orientadas a la obtención de etanol, mediante la transformación de los materiales lignocelulósicos, como la paja de cereales, el bagazo, los residuos de madera y los desechos del procesamiento de frutas y verduras. Enseguida, se presenta una breve descripción y comparación de las principales tecnologías, basada en los aspectos más sobresalientes de cada una:

1.4.1 SACARIFICACIÓN Y FERMENTACIÓN SIMULTÁNEA (SFS)

La NREL (National Renewable Energy Laboratory) es una de las instituciones que mayor investigación aporta desde hace varios años al desarrollo de esta tecnología. “El proceso SFS requiere la acción de celulosomas para degradar la celulosa presente en los materiales lignocelulósicos. Las celulasas producen los azúcares que los microorganismos responsables de la fermentación convierten a etanol”⁸.

Se requieren diferentes métodos de pretratamiento para incrementar el acceso de las enzimas a la celulosa. Inicialmente se realiza una prehidrólisis con ácido sulfúrico, para incrementar la digestibilidad de las fibras lignocelulósicas. En esta

⁷ PARSONS, CAROLINA; BANQUETH, EMMANUEL. Diseño de una planta piloto para la producción de etanol a partir de el bagazo de la caña de azúcar. Tesis de grado, UIS, 2004.

⁸ Ballesteros I., Ballesteros M., Cabañas A., Carrasco J., Martín C., Negro M. J., Saez F., & Saez R. (1991) Selection of thermotolerant yeasts for simultaneous saccharification and fermentation (SSF) of cellulose to ethanol. *Appl. Biochem. Biotechnol.* 28/29: 307-15.

operación, se ensanchan las porosidades de la fracción de hemicelulosa, lo que facilita el ataque enzimático. El xilano se hidroliza en un 93% produciendo pulpa de celulosa totalmente digerible por la encima.

La hidrólisis enzimática y la fermentación se realizan a temperatura y presión bajas. (Dekker and Wallis, 1983; Ingram, et al., 1998; Ferrell, 2000). La ventaja que ofrece este proceso radica en la presencia de la enzima y el microorganismo en el mismo sistema, al reducir la formación de complejos enzimáticos. A su vez, minimiza el efecto inhibitorio del azúcar sobre la enzima, ya que a medida que se forma la glucosa se convierte a etanol. La limitación del proceso SSF se encuentra en la baja tolerancia del microorganismo a la temperatura y al etanol, más que en el desempeño de la enzima. En la figura 1.2 se presenta un diagrama de bloques del proceso SFS.

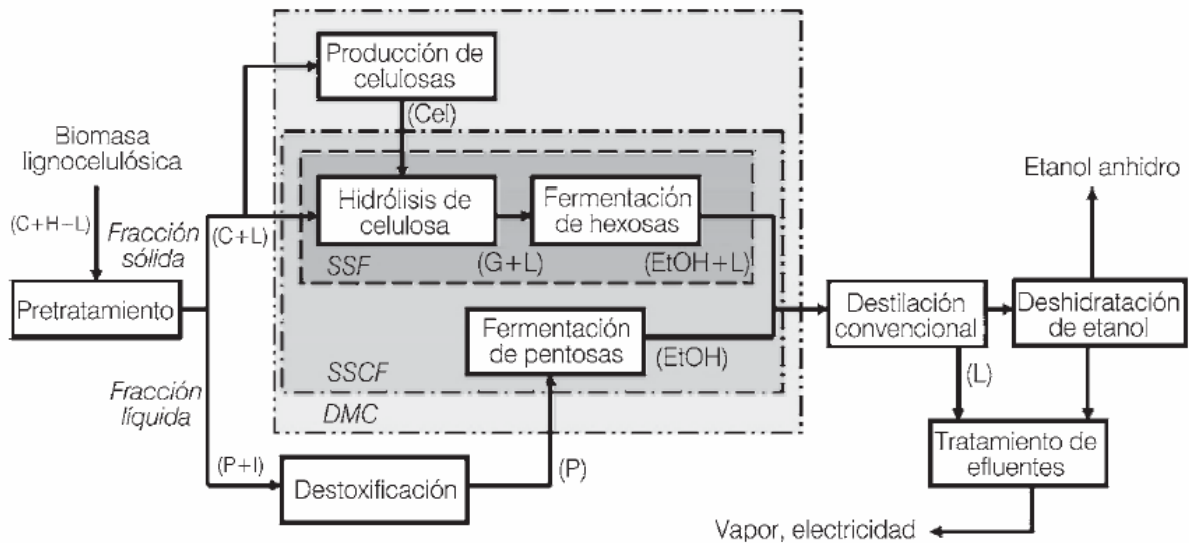


Figura 1.4 Producción de alcohol a partir de biomasa lignocelulósica. SSF: fermentación y sacarificación simultáneas, SSCF: sacarificación y co-fermentación simultáneas, DMC: conversión microbiana directa, Cel: celulasas, C: celulosa, EtOH: etanol, G: glucosa, H: **hemicelulosa**, I: inhibidores de la fermentación, L: lignina, P: pentosas. (http://www.interciencia.org/v30_11/679.pdf).

1.4.2 HIDRÓLISIS CON ÁCIDO DILUÍDO. NEUTRALIZACIÓN Y FERMENTACIÓN

Esta tecnología comenzó a desarrollarse desde los años 50 por Tennessee Valley Authority (TVA). Se enfoca al tratamiento de desechos agrícolas y orgánicos, transformándolos en azúcares fermentables para la producción de etanol.

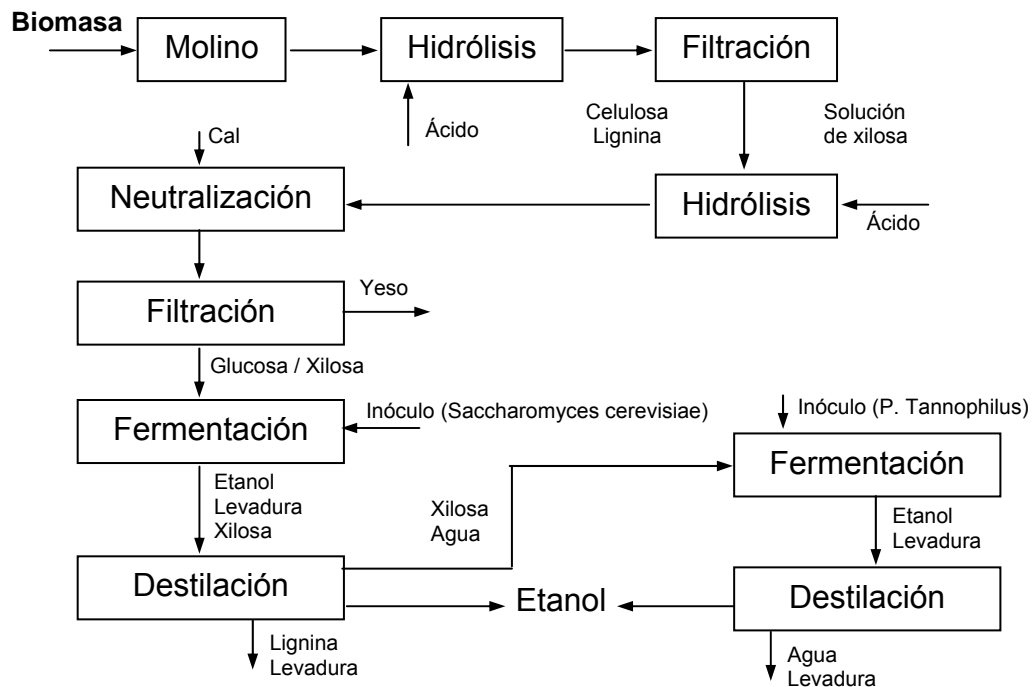


Figura 1.5 Hidrólisis con ácido diluido. Neutralización y fermentación

Fuente: (<http://www.hort.purdue.edu/newcrop/proceedings1990/v1-257.html>)

En la Figura 1.3 se observa que el proceso se inicia con la recolección de la Biomasa; se seca y se muele hasta un tamaño de partícula de 5 mm (malla 4). Luego, se pasa a una primera etapa de hidrólisis donde se agrega ácido sulfúrico al 7.65% p/p y se calienta a 100 °C por dos horas. Cerca del 75% de la hemicelulosa se hidroliza a xilosa. El remanente de sólidos (lignina y celulosa) se remueve en un filtro prensa y se pasa a un reactor en donde la temperatura se incrementa para hidrolizar la celulosa a glucosa. El resultado es una mezcla de pentosas, hexosas y una solución que contiene 11.6% de glucosa, 9% de xilosa (Broder and Barrier, 1990; Demain et al, 2005). La fermentación se lleva a cabo

por etapas. Primero, la glucosa se fermenta a etanol por la levadura *Sacharomyces cerevisiae*. La mezcla resultante se destila para remover el etanol. Se agrega al residuo de la solución una segunda levadura, *Pachysolen tannophilus*, la cual fermenta la xilosa a etanol. La lignina y el material celular se secan y se utilizan como combustible de caldera.

1.4.3 HIDRÓLISIS CON ÁCIDO CONCENTRADO. RECUPERACIÓN DEL ÁCIDO Y FERMENTACIÓN

La principal característica es el método utilizado para separar y recircular el ácido sulfúrico concentrado que se utiliza en el proceso. A diferencia de la hidrólisis ácida diluída, esta tecnología opera a temperaturas y presiones moderadas, las cuales evitan la formación de subproductos que inhiben la fermentación (Wituschek 1999, Ferrell, 2000; <http://calvin.biotech.wisc.edu/jeffries/bioprocessing/bioconversion>).

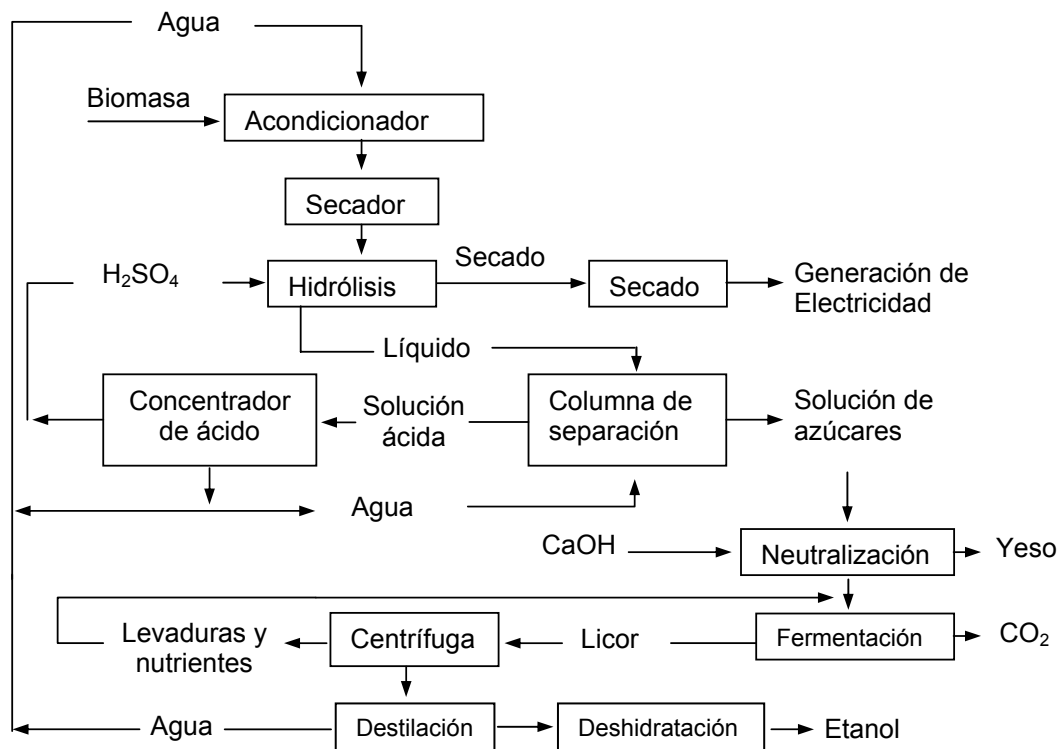


Figura 1.6 Hidrólisis con ácido concentrado. Recuperación del ácido y fermentación.

El proceso se muestra en la Figura 1.4, y se realiza en seis operaciones unitarias básicas; prehidrólisis e hidrólisis ácida, separación del ácido y los azúcares, recuperación y recirculación del ácido, fermentación de los azúcares y destilación. Previamente se obtiene, por molienda de la biomasa, un tamaño de la partícula entre 0.075 – 7 mm. La prehidrólisis se realiza con ácido diluído, a presión atmosférica, temperatura entre 30 – 37°C y tiempos de reacción entre 10 – 40 minutos (Cuzens, 1997), y la hidrólisis con ácido sulfúrico concentrado, a presión atmosférica, temperatura entre 90 – 100°C y tiempos de reacción entre 10 – 24 minutos, obteniéndose una solución resultante de estos dos procesos, la cual contiene azúcar, ácido sulfúrico, agua y lignina.

La lignina se separa de la solución utilizando un filtro prensa. (Cuzens, 1997). La solución ácida con el azúcar se lleva a una unidad de separación cromatográfica que genera dos corrientes. La primera, de ácido sulfúrico – se recupera el 90%-, que se concentra y se recircula de nuevo al proceso. La segunda corriente de azúcar, levemente ácida, se neutraliza con cal. La fermentación se realiza hasta por 96 horas, a condiciones microaerofílicas de 0.1 – 0.5 mg/L de oxígeno, pH de 5.5 y temperatura de 32°C.. Finalmente, el etanol se purifica mediante destilación (Cuzens, 1997).

Cabe señalar que existen otras tecnologías para realizar hidrólisis de material lignocelulósico, como es el proceso AFEX (*Ammonia Freeze Explosion*), el proceso steam-explosion o de explosión al vapor (*TM-V Termomecánicos con inyección de vapor*), el proceso TM-AV (*termomecánicos con inyección de vapor en fase acuosa*), el proceso TM-S (*termomecánicos en fase orgánica*), el proceso Milox y la extracción con acetona acidificada, hidrólisis ácida y fermentación, entre otros.

1.5 MICROORGANISMOS UTILIZADOS EN LA PRODUCCIÓN DE ETANOL

1.5.1 *Zimomonas mobilis*

Se considera una alternativa para producir etanol a gran escala. En estudios comparativos con levaduras, a nivel de laboratorio, planta piloto y en fermentaciones por lotes, la bacteria presenta las siguientes ventajas:

- Mayor captación de azúcar y mayor producción de etanol. Posee un transporte de fácil difusión de azúcar (Dimarco y Romano, 1985).
- Menor producción de biomasa. Las levaduras producen 2 moles de ATP, por mol de glucosa, las *Z. Mobilis* fermenta glucosa y produce solo 1 mol de ATP por mol de glucosa (Dimarco y Romano, 1985).
- Mayor tolerancia al etanol. Esta bacteria puede lograr concentraciones de etanol superiores al 12% p/v en fermentaciones con glucosa (Gunasekaran y Chandra, 1999).

1.5.2 *Saccharomyces Cerevisiae*

Es la levadura más utilizada para la fermentación de azúcares a etanol; ya que fermenta eficientemente los azúcares de seis carbonos a etanol. En el caso del material lignocelulósico, donde además de hexosas, como la glucosa, también se tienen azúcares de cinco carbonos. La levadura no puede utilizar este sustrato como fuente de carbono. Esto se traduce en una disminución del rendimiento del proceso y por lo tanto si se quieren transformar las pentosas, se hace necesario utilizar microorganismos separados para fermentar las pentosas y las hexosas y esto requiere de dos tanques de fermentación distintos, aumentando así el costo del proceso⁹. (Ver ficha técnica Anexo B)

⁹ CHALELA ÁLVAREZ, Graciela. Bioobtención de Alcohol a partir de Residuos Celulósicos. Universidad Industrial de Santander. 2001

2 DISEÑO PRELIMINAR, MONTAJE Y OPERACIÓN DE UN PROCESO DE OBTENCIÓN DE ETANOL A PARTIR DE MATERIAL LIGNOCELULÓSICO DE FRUTAS

El diseño preliminar, montaje y operación de un proceso de obtención de etanol, busca la selección de una tecnología para la hidrólisis y fermentación del material lignocelulósico de cáscaras de frutas, generado en “La plaza de Mercado Guarín”, en la ciudad de Bucaramanga. De igual manera, se generará una alternativa de gestión integral de estos residuos sólidos orgánicos, obteniendo subproductos de valor agregado, y de cierta forma se minimizará la cantidad de desechos que se disponen en el relleno sanitario de la ciudad (“El Carrasco”).

2.1 GENERALIDADES DEL PROCESO

La principal fuente de materia prima corresponde a las cáscaras de frutas, como se mencionó anteriormente. Éstas pueden conseguirse en diferentes zonas (plazas de mercado y expendios de frutas), de la ciudad de Bucaramanga. Este proceso requiere, al inicio, acondicionar las cáscaras de frutas aplicando un proceso de molienda, con el cual se obtiene un tamaño menor de partícula y una mayor área de contacto. Una vez concluída esta etapa, se procede a la preparación del jugo para fermentación, actividad que se desarrolla hidrolizando el material lignocelulósico. En esta operación se obtiene un jugo con un nivel de azúcares adecuado para la etapa posterior, que corresponde a una fermentación alcohólica. Luégo de llevar a cabo la fermentación, la solución se pasa por un filtro, en el cual se pueda separar la mayor cantidad de sólidos en suspensión, y finalmente, se realiza una destilación simple para separar el alcohol.

Para esquematizar mejor la metodología desarrollada, se presenta a continuación un diagrama de bloques y la descripción general de cada una de las operaciones unitarias que intervienen en el proceso preliminar:

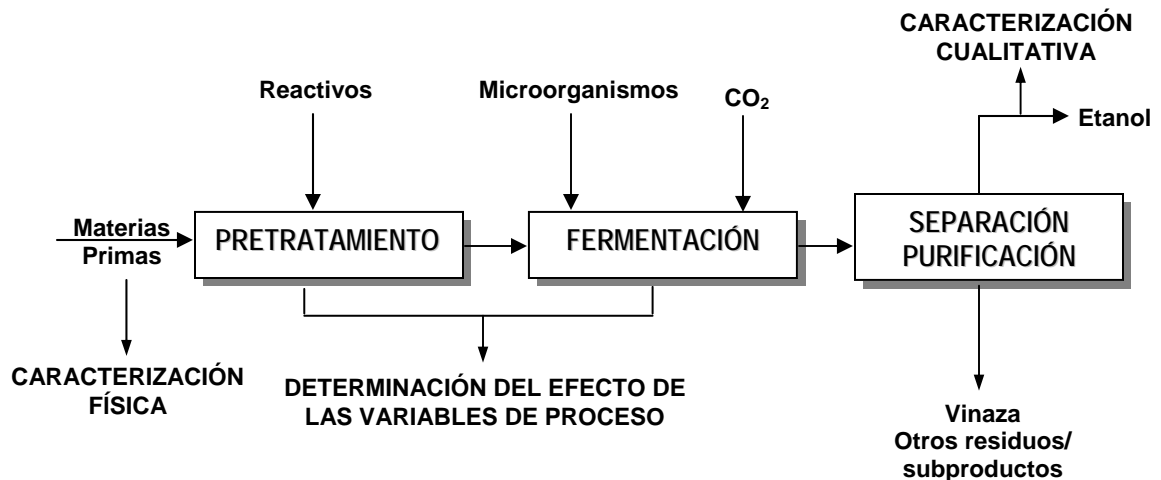


Figura 2.1 Esquema general de las etapas del desarrollo experimental.

2.1.1 SELECCIÓN, CARACTERIZACIÓN Y PRETRATAMIENTO DEL SUSTRATO

2.1.1.1 Materia prima

El material lignocelulósico utilizado fue biomasa de frutas¹⁰ (cáscaras de naranja, piña, patilla, papaya y banano), recolectadas en “La plaza de Mercado Guarín”, en la ciudad de Bucaramanga. La adquisición de esta materia prima no tiene costo alguno, debido a que los residuos generados en este lugar corresponden a las actividades que allí se desarrollan (venta de jugos, ensaladas, frutas, etcétera).

La selección de los residuos se realizó determinando la composición física como se puede ver en la siguiente tabla:

¹⁰ El desarrollo de las pruebas experimentales se realizó utilizando solamente los cinco tipos de cáscaras presentes en mayor porcentaje en los RSO (ver tabla 2.1).

Tabla 2.1 Composición física de los RSO generados en la plaza de mercado

Clase de RSO	Porcentaje (en peso)
Naranja	38,33
Piña	17,56
Patilla	11,78
Papaya	7,19
Banano	6,07
Mandarina	5,36
Limón	5,14
Zanahoria	3,5
Melón	1,46
Mango	1,32
Fresa	1,21
Otros	1,08

Método de muestreo: Técnicas de laboratorio para el análisis de alimentos. Selección de muestras por cuarteo, preparación y desmuestre. Ver apéndice A.



Figura 2.2 Recolección de los residuos de frutas en plazas de mercado y expendios de frutas de la ciudad.

2.1.1.2 Sección de molienda

Los residuos sólidos orgánicos de frutas provenientes de las plazas de mercado, se encontraron en su forma indemne, por lo cual fue necesario buscar un tamaño de partícula que permitió obtener una mayor área de contacto para alcanzar una conversión alta de azúcares fermentables.

El tamaño y la forma de las partículas del material orgánico influyen en la hidrólisis; p. ej., “las partículas planas son las que tienen velocidad de degradación más lenta; las cilíndricas una velocidad media, y la velocidad de degradación mayor corresponde a las de forma esféricas; de la misma forma, las partículas grandes tienen una velocidad de degradación más lenta que las de tamaño pequeño”¹¹

El proceso de trituración y molienda se desarrolló en tres etapas, las cuales se describen a continuación:

- En la primera etapa se evaluó el efecto del tamaño de partícula, temperatura, tiempo de retención, relación sustrato – agua y concentración de ácido sulfúrico, respecto a la variable de proceso (grados Brix). En el desarrollo, se utilizó un autoclave (ver figura 2.3) en el cual se realizaron varios experimentos, identificando los efectos mencionados.



Figura 2.3 Determinación del efecto del tamaño de partícula.

- Una vez concluida la experimentación anterior, se procedió a desarrollar la segunda y tercera etapas, en las cuales se buscó un tamaño de partícula de

¹¹ CHALELA ÁLVAREZ, Graciela. Producción de etanol a partir del almidón de papa mediante acción combinada con *aspergillus niger* y *saccharomyces cerevisiae*, y evaluación de los productos intermedios formados durante el bioproceso. UIS - 1997.

2 mm. En la figura 2.4 se muestra el molino utilizado para obtener un tamaño alrededor de 6 mm, y luego, con la ayuda de una licuadora (ver figura 2.5), se redujo el tamaño entre 2 y 3 mm aproximadamente.



Figura 2.4 Molino para reducción de tamaño de partícula a 6 mm (Etapa 2)



Figura 2.5 Licuadora para reducción de tamaño de partícula entre 2-3 mm (Etapa 3)

Las características fisicoquímicas del sustrato están resumidas aquí:

Tabla 2.2 Caracterización fisicoquímica aproximada del sustrato después de la reducción de tamaño.

Parámetro	Unidades	Valor
Tamaño de partícula	mm	2 - 3
Densidad real	kg/m ³	1063
Densidad aparente	kg/m ³	934
Sólidos totales	% (p/p)	16,0 – 18,0
Sólidos volátiles	kg/m ³	158.8
Carbono orgánico total	% (p/p)	39,0 - 48,0
Nitrógeno total	% (p/p)	0,35 – 1,19
Potasio	% (p/p)	2,46
Fósforo	% (p/p)	0,22

Fuente: CEIAM-CICELPA-UIS, 2003 (Datos de un sustrato lignocelulósico análogo)¹².

Con el fin de conocer la naturaleza del sustrato que se utiliza en el proceso de obtención de etanol, de manera tal que sirva como base para posteriores análisis, se presentan otros valores de algunos parámetros importantes en la caracterización del sustrato:

¹² CRISTANCHO, Diego. estudio del efecto del tiempo de retención hidráulico, la temperatura y el contenido en carga orgánica en el proceso de digestión anaerobia en dos fases de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos. Trabajo de grado de maestría – UIS 2005.

Tabla 2.3 Composición general del sustrato

Componente	%p/p en Sustrato Seco
Material Fácilmente Biodegradable	81,2
Celulosa	30-40
Hemicelulosa	20-30
Lignina	5-10
Cenizas	1,23

Fuente: CEIAM-CICELPA-UIS, 2003 (Datos de un sustrato lignocelulósico análogo)¹³.

Tabla 2.4 Composición del sustrato según su naturaleza biodegradable

Extraíbles totales		Solubles		Composición del material				
Alcohol + Benceno	EtOH	Agua caliente	Total extraíbles	Solubles en agua caliente	Solubles en NaOH al 1%	Extraíbles totales	Lignina + Holocelulosa	Cenizas
0,851	5,53	46,89	53,25	42,64	81,87	53,25	46,75	1,23

Fuente: CEIAM-CICELPA-UIS, 2003 (Datos de un sustrato lignocelulósico análogo)¹⁴.

Con base en los resultados presentados en las *Tablas 2.3 y 2.4*, se puede observar que el material presenta un alto contenido en extraíbles, considerados polares y no polares. Sin embargo, es importante resaltar que a pesar de que se presenta un alto contenido orgánico de rápida degradación en el sustrato, no toda esta fracción corresponde a una fase hidrolizable.

2.1.1.3 Sección de hidrólisis del material lignocelulósico

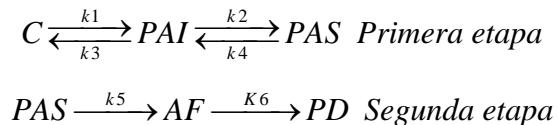
La hidrólisis puede ser de tipo químico o enzimático. Esta última requiere del empleo de microorganismos capaces de transformar directamente la holocelulosa en etanol. La utilización de tales microorganismos requiere de grandes inversiones y una absoluta caracterización e identificación, aunque cabe destacar que existen algunos estudios en el país que se enfocan hacia este tema¹⁵. La hidrólisis ácida concentrada presenta en la actualidad los mejores rendimientos con destino a azúcares. Sin embargo, requiere de un alto nivel de inversión inicial y de

^{13,14} CRISTANCHO, Diego. estudio del efecto del tiempo de retención hidráulico, la temperatura y el contenido en carga orgánica en el proceso de digestión anaerobia en dos fases de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos. Trabajo de grado de maestría – UIS 2005.

¹⁵ MONTOYA, D., Spitia, S., Silvia, E. & Schwarz, W. (2000). Isolation of mesophilic solvent-producing strains from Colombia sources: Physiological characterization.

operación, como consecuencia de la necesidad de recuperar y recircular el ácido sulfúrico que se emplea.

Este tipo de hidrólisis ha sido bastante investigada [3, 14, 16, 23], pero existen muchas contradicciones en los resultados de los estudios cinéticos realizados. El mecanismo general de sacarificación se puede representar por el siguiente modelo cinético que fue estudiado experimentalmente¹⁶:



Donde *C* es la holocelulosa; *PAI*, son polímeros de azúcares (principalmente D-glucosa y xilosa) insolubles en ácido diluido; *PAS*, son polímeros de azúcares solubles en ácido diluido; *AF*, es azúcares fermentables y *PD*, son productos de descomposición. En esta etapa se evaluó el efecto de algunas variables de proceso sobre los grados Brix del efluente del reactor de hidrólisis. Fue necesaria la utilización del reactor químico mostrado en la figura 2.6, el cual opera a presiones mayores de seis atmósferas y una temperatura máxima de 170 °C



Figura 2.6 Reactor Batch para hidrólisis térmica catalizada con chaqueta de calentamiento. Capacidad 20 L

¹⁶ DUQUE, A.; Salguero, A. y SALAZAR, H. Etanol a partir de desechos agrícolas. Hidrólisis ácida de holocelulosa. Colombia 1979.

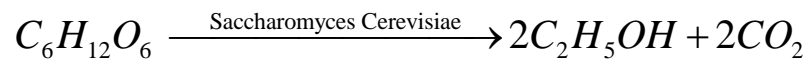
Para el diseño de los experimentos en la etapa de hidrólisis se tuvieron en cuenta las siguientes variables de operación: temperatura (T) y tiempo de retención hidráulico (TRH). Los valores empleados para cada una de las variables mencionadas se muestran en la tabla 2.5. Estos valores se escogieron teniendo en cuenta los presentados en la literatura para experiencias similares¹⁷:

Tabla 2.5 Variables de proceso empleadas en el diseño experimental en la etapa de hidrólisis

Variable	Valor
Temperatura	T ₁ (120 °C) – T ₂ (160 °C)
TRH	TRH ₁ (10 min) – TRH ₂ (25 min)

2.1.2 FERMENTACIÓN DEL SUSTRATO

En esta etapa, los azúcares fermentables son transformados a etanol por la acción de la levadura *Saccharomyces Cerevisiae* y la estequiometría de la reacción de producción de etanol, corresponde a una descomposición de una molécula de glucosa para generar dos moléculas de dióxido de carbono y dos de alcohol etílico.



La ecuación que representa la velocidad específica de crecimiento de la bacteria, corresponde a un modelo de inhibición por producto que se ha formado, a partir de datos cinéticos obtenidos en reactores de mezcla completa. (P. Gunasekaran y k. Chandra Raj. India, 1999)

$$\mu = \mu_m \left(1 - \frac{P}{P^*}\right)^N \frac{S}{S + K_s} = 0.42 \left(1 - \frac{P}{87.5}\right)^{0.41} \frac{S}{S + 0.22}$$

donde las variables,

¹⁷ J. R. Ferrer², G. Páez², L. Arenas de Moreno³, C. Chandler², Z. Mármol² y L. Sandoval³. Cinética de la hidrólisis ácida de material lignocelulósico¹. // 1- Proyecto financiado por el Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico (CONDES) LUZ. 2- Laboratorio de Fermentaciones Industriales. Departamento de Ingeniería Bioquímica. Facultad de Ingeniería, La Universidad del Zulia (LUZ). 3- Facultad de Agronomía. Instituto de Investigaciones Agronómicas. LUZ.

μ, μ_m = velocidades específicas de crecimiento del inóculo (h⁻¹)
P = concentración del producto inhibidor (g/L)
P* = concentración crítica del inhibidor que para completamente el proceso (g/L)
N = constante relacionada con el poder tóxico del inhibidor.
S = concentración del sustrato (g/L)
K_S = constante de Monod (g/L)

En la operación de fermentación se emplearon las condiciones típicas (Gunasekaran y Chandra, 1999; Springer Berlin / Heidelberg 2001; Eliasson / Christensson, 2000) de temperatura de 25 °C – 35 °C , pH de 4.3 – 4.8, 10% de volumen de inóculo y un sistema adicional de agitación.

Para desarrollar la operación de fermentación de la solución de azúcares se inoculó el sustrato en el reactor Batch mostrado en la figura 2.7 con la levadura *Saccharomyces cerevisiae*.



Figura 2.7 Reactor Batch de fermentación con serpentín para calentamiento. Capacidad 20 L.

Para el diseño de los experimentos en la etapa de fermentación se tuvieron en cuenta las siguientes variables de operación: temperatura (T), y tiempo de retención (TR). Los valores empleados para cada una de las variables mencionadas se muestran en la Tabla 2.6.

Tabla 2.6 Variables de proceso empleadas en el diseño experimental en la etapa de fermentación

Variable	Valor
Temperatura	T_1 (Ambiente 25-30 °C) – T_2 (33 °C)
TRH	TRH ₁ (48 h) – TRH ₂ (72 h)

2.1.3 SEPARACIÓN Y PURIFICACIÓN DEL SUSTRATO FERMENTADO

2.1.3.1 Sección de separación

El proceso de separación de la fase líquida de la sólida se llevó a cabo utilizando un filtro, en el cual se retuvieron los sólidos, como la lignina, fibras y algunos residuos provenientes de las etapas anteriores, con el fin de que la solución fuera clara y pudiera ser transportada al sistema de destilación.

2.1.3.2 Sección de Destilación

Finalmente, el filtrado se destiló utilizando el equipo mostrado en la figura 2.8 y se recogió una solución de agua-etanol que posteriormente se volvió a destilar utilizando un equipo similar con sistema de vacío (ver figura 2.9).



Figura 2.8 Equipo de destilación simple.
Capacidad 8 L



Figura 2.9 Equipo de destilación simple.
Capacidad 50 mL

En el desarrollo experimental de esta etapa, inicialmente se realizó la destilación, operando el proceso a una temperatura no mayor a los 90°C, por

aproximadamente 1 hora. En la segunda destilación se manejó un tiempo de 30 mins. a una temperatura inferior a los 76 °C.

A continuación se presenta el diagrama de proceso de las operaciones unitarias involucradas en el análisis del diseño preliminar del proceso de éste:

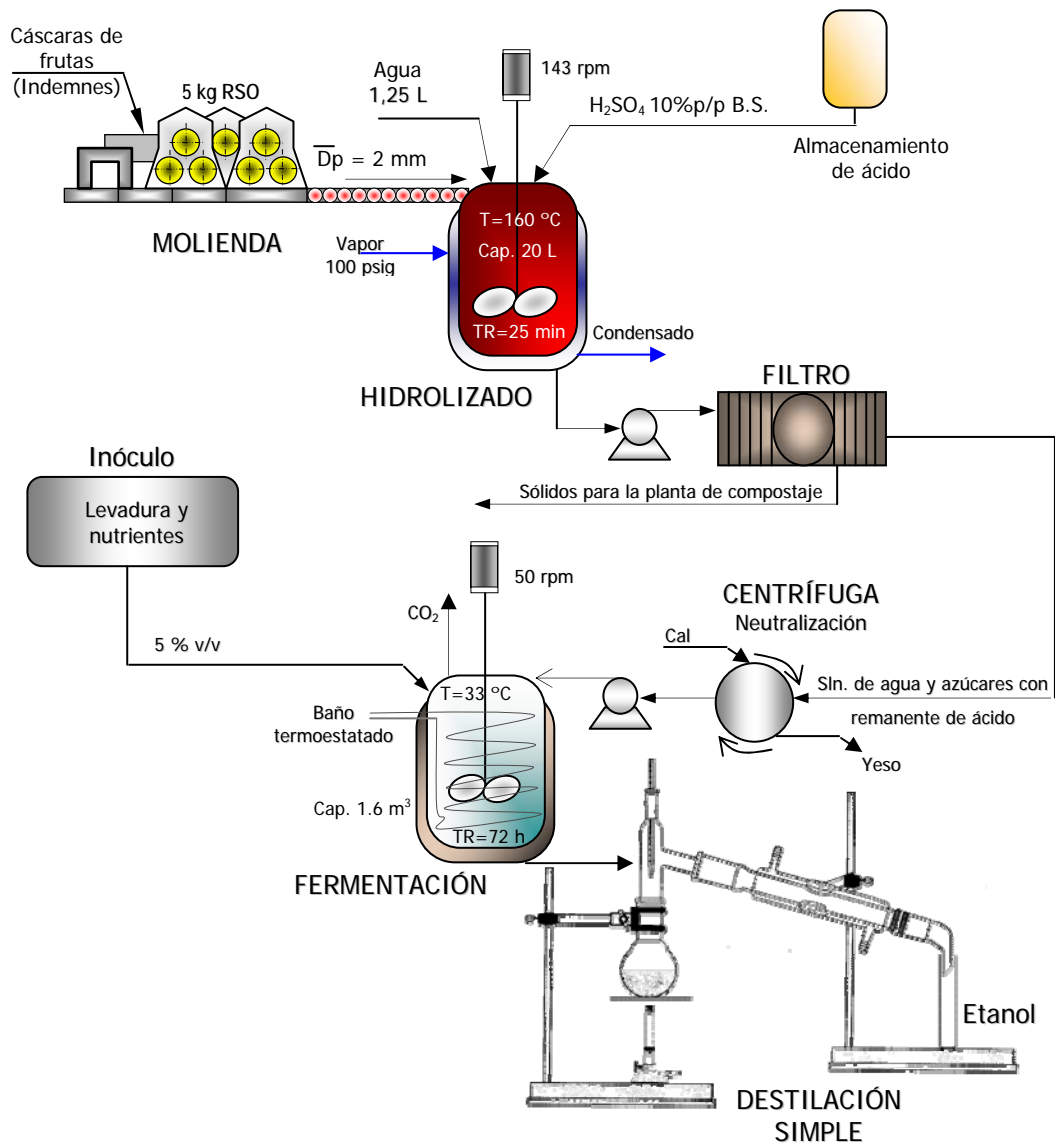


Figura 2.10 Diagrama PFD de la etapa de diseño preliminar de un proceso de obtención de etanol a partir de material lignocelulósico de cáscaras de frutas.

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 CARACTERIZACIÓN INICIAL DEL EFECTO DE LAS VARIABLES DE PROCESO SOBRE LOS °BRIX

Inicialmente se evaluó el efecto del tamaño de partícula, temperatura, tiempo de retención, relación sustrato – agua y concentración de ácido, a escala de Beaker. El análisis de varianza (ANOVA) se realizó con el paquete estadístico STATGRAPHICS 5.1 (*versión demo*), utilizando los datos del diseño experimental que se necesitaron para estimar los efectos de 5 factores categóricos con dos niveles de operación. El diseño factorial estándar, consiste en todas las combinaciones posibles de los niveles de los factores, es decir, un total de 32 ejecuciones en el diseño.

Tabla 3.1 Análisis de varianza para °Brix – Diseño Factorial 2⁵

Fuente	Suma de cuadrados	GL	Cuadrado Medio	Cociente-F	Valor-P
EFFECTOS PRINCIPALES					
A:Tamaño Partícula mm	35,9128	1	35,9128	221,43	0,0000
B:Tiempo Retención min	23,9778	1	23,9778	147,84	0,0000
C:%p/p H2SO4 B.S.	43,9453	1	43,9453	270,95	0,0000
D:Sustrato:agua (kg/L)	10,2378	1	10,2378	63,12	0,0000
E:Temperatura °C	3,31531	1	3,31531	20,44	0,0003
INTERACCIONES					
AB	0,0903125	1	0,0903125	0,56	0,4664
AC	3,18781	1	3,18781	19,66	0,0004
AD	0,812813	1	0,812813	5,01	0,0397
AE	0,877813	1	0,877813	5,41	0,0335
BC	2,58781	1	2,58781	15,96	0,0010
BD	0,0703125	1	0,0703125	0,43	0,5196
BE	0,0253125	1	0,0253125	0,16	0,6980
CD	0,0703125	1	0,0703125	0,43	0,5196
CE	1,01531	1	1,01531	6,26	0,0236
DE	0,0253125	1	0,0253125	0,16	0,6980
RESIDUOS	2,595	16	0,162188		
TOTAL (CORREGIDO)	128,747	31			

N.B.: Los resultados de la variable de respuesta para cada uno de los experimentos se reportan en el anexo F.

En este procedimiento se realizó un análisis multifactorial de la varianza para los °Brix. Se aplicaron varios tests y gráficos de medias y de interacción, para determinar los factores que tienen un efecto estadísticamente significativo en la

variable de respuesta, y finalmente se analizaron las interacciones significativas entre los factores. La tabla ANOVA descompone la variabilidad de °Brix en las contribuciones debidas a varios factores. Los cocientes-F en la tabla, permiten identificar los factores significativos y los valores-P comprueban la importancia estadística de cada uno de estos factores.

Tabla 3.2 Resumen y base del diseño experimental

Factor o Efecto Principal	Unidad	Nivel	
		1	2
Tamaño de partícula	mm	8	2
Tiempo de retención	min	10	20
%p/p H ₂ SO ₄ adicionado base seca (B.S.)	%	0	10
Relación Sustrato:Agua	kg/L	2	4
Temperatura	°C	80	120
Variable de Respuesta			
Grados Brix	%	---	---

Dado que diez valores-P presentan un resultado inferior a 0,05 (nivel de significancia), se comprueba entonces, que todos los factores tienen un efecto estadísticamente significativo del 95% en los °Brix y que el mayor valor de la variable de respuesta se obtiene operando todos los factores en el nivel dos.

3.2 DETERMINACIÓN DEL EFECTO DE LA TEMPERATURA Y TIEMPO DE RETENCIÓN SOBRE LA HIDRÓLISIS DEL MATERIAL LIGNOCELULÓSICO EN UN REACTOR BATCH

Una vez realizado el análisis preliminar, donde se concluyó que existe un efecto significativo al operar los cinco factores principales en sus niveles más altos, se procedió a escalar la etapa de hidrólisis, “fijando el valor de operación para dos variables de proceso”¹⁸. Seguidamente, se presenta el ANOVA correspondiente a los dos factores categóricos, con los dos niveles de operación y dos repeticiones experimentales.

¹⁸ Se fijó el valor para las variables tamaño de partícula, %p/p H₂SO₄ adicionado y la relación sustrato-agua, basados en limitaciones para reducción de tamaño y recirculación del catalizador adicionado.

Tabla 3.3 Resumen y base del diseño experimental

Factor o Efecto principal	Unidad	Nivel	
		1	2
Tiempo de retención	min	10	25
Temperatura	°C	120	160

Tabla 3.4 Análisis de varianza para °Brix – Diseño Factorial 2²

Fuente	Suma de cuadrados	GL	Cuadrado Medio	Cociente-F	P-Valor
EFFECTOS PRINCIPALES					
A: Temperatura	3,78125	1	3,78125	91,67	0,0007
B: Tiempo Retención	10,3512	1	10,3512	250,94	0,0001
INTERACCIONES					
AB	0,10125	1	0,10125	2,45	0,1922
RESIDUOS	0,165	4	0,04125		
TOTAL (CORREGIDO)	14,3988	7			

N.B.: Los resultados de la variable de respuesta para cada uno de los experimentos se reportan en el anexo F.

En la tabla ANOVA se observa la contribución de los efectos principales frente a la variable de respuesta, dado que los valores-P tienen un valor inferior a 0,05 (nivel de significancia). Para este experimento se analizaron los gráficos de medias y de interacción, concluyéndose que los efectos principales influyen significativamente y además deben operarse en su nivel más alto.

3.3 EFECTO DEL TIEMPO DE FERMENTACIÓN Y DE LA TEMPERATURA EN LA PRODUCCIÓN DE ETANOL

En la figura 2.7 se mostró el Reactor Batch de fermentación con serpentín para calentamiento, el cual se utilizó para transformar los azúcares fermentables a etanol, inoculando con la levadura *Saccharomyces cerevisiae*. El análisis utilizado para esta etapa se muestra a continuación:

Tabla 3.5 Resumen y base del diseño experimental

Factor o Efecto principal	Unidad	Nivel	
		1	2
Temperatura	°C	Ambiente 25-30 °C	33
Tiempo de fermentación	h	48	72

Tabla 3.6 Resultados del diseño experimental

Temperatura [°C]	Tiempo de residencia [h]	Vol. EtOH obtenido [mL]
1	1	111
1	2	114
2	1	116
2	2	120

En el desarrollo experimental para la etapa de fermentación se evaluó el efecto de dos factores con dos niveles de operación. La variable de respuesta correspondió a la cantidad de etanol obtenido. Se observa en la tabla 2.11 que el máximo valor se logra cuando se opera en los niveles más altos de cada variable.

3.4 PERSPECTIVAS DE FUTURO PARA LA PRODUCCIÓN DEL ETANOL A PARTIR DE MATERIAL LIGNOCELULÓSICO DE FRUTAS

Entre las tecnologías para la producción de etanol, las basadas en hidrólisis térmica catalizada, se vislumbran como las de mayores rendimientos potenciales. Aunque los procesos de hidrólisis ácida han sido estudiados ampliamente, durante la última década se han producido avances significativos en el desarrollo de cada una de las etapas que componen el proceso (pretratamiento, hidrólisis térmica catalizada, fermentación, recuperación del ácido, separación del producto y tratamiento de los efluentes del proceso). No obstante, todavía existen oportunidades para conseguir progresos significativos que conduzcan a aumentar el rendimiento y la productividad y, por lo tanto, a la reducción de los costos de esta tecnología. Las áreas que necesitan un refuerzo de investigación adicional, y que conducirán a la adquisición de nuevos conocimientos que contribuyan a mejorar la economía del proceso se centran, por un lado, en el desarrollo de las tecnologías de pretratamiento e hidrólisis más eficientes y, por otro lado, en la mejora del microorganismo que realiza la etapa de fermentación.

Es necesario seguir investigando en el desarrollo de tecnologías de pretratamiento de los materiales lignocelulósicos que aumenten el rendimiento de obtención de azúcares fermentables y disminuyan los productos de degradación. También es necesario avanzar en el desarrollo de nuevos catalizadores para la hidrólisis, ya que uno de los mayores obstáculos para la comercialización de estas tecnologías es el alto precio de los reactivos.

Finalmente, el costo de los microorganismos encargados de la fermentación, con altos rendimientos en el desempeño (termotolerantes), se supone alrededor de unos \$ 0,3 USD por litro de etanol producido. Se calcula, que este costo debe ser reducido alrededor de 5 veces para que el etanol sea económicamente competitivo, aumentando la actividad específica y la eficiencia de producción de los microorganismos.

3.5 ANÁLISIS ECONÓMICO

Basados en la situación bajo la que se llevaría a cabo este proyecto (carácter de planta piloto), se hicieron las diferentes evaluaciones para el montaje de la misma, con el fin de encontrar si el costo de producción, permitiría a futuro, realizar un escalamiento de la planta a nivel industrial, ya que bajo la característica de piloto, sólo trae beneficios de impacto para estudios de investigación. El tiempo de evaluación del proyecto es de 10 años. El año cero corresponde al momento de partida en cuanto al funcionamiento de la planta, con una producción al 100% de la capacidad sin proyección de crecimiento en cuanto a los niveles de producción.

Los ingresos estarán determinados por la venta del etanol. El precio, como se mostrará posteriormente, se obtuvo del costo de manufactura que es de \$1929 por litro para el primer año, y del segundo en adelante, teniendo en cuenta que la

economía del proceso radica en la recuperación y recirculación del ácido el precio por litro, estaría alrededor de \$1100

Los costos de administración, ventas y fabricación se determinan según el requerimiento para un buen funcionamiento de la planta y los equipos. Estos son fijos, según los parámetros legales salariales y de prestaciones en Colombia. Los empleados están conformados por un Gerente, un jefe de planta, una secretaria y los operarios.

Para este proyecto se necesita una inversión inicial de \$ 200.350.000 millones de pesos. De éstos se utilizarían \$ 25.000.000 para el acondicionamiento de la bodega y local para la planta; \$98.000.000 para la compra de maquinaria y equipos; \$ 7.000.000 para muebles y equipos de oficina. Estos rublos representan la inversión fija y el financiamiento de un capital de trabajo de \$10.000.000 que sostenga 15 días de operación, son los que conforman la inversión circulante necesaria para el proyecto.

El financiamiento de esta inversión, se toma a partir de un crédito del 50% del dinero necesario, bajo una tasa de interés bancaria de 13.85% y el otro 50% proviene de capital propio. La tasa interna de retorno que nos arroja este proyecto es del 38%, el hecho de que esta tasa sea superior a la tasa de interés del préstamo, nos indica que es posible y financieramente factible realizar este proyecto, ya que arrojaría los resultados e ingresos necesarios para cubrir el costo del 13.85% de los intereses del crédito

La información respectiva al análisis económico se puede observar en el Anexo E.

CONCLUSIONES

El desarrollo de la industria de producción de alcohol, demuestra que aún falta resolver complejos problemas técnicos que influyen sobre los indicadores económicos del proceso global, así como sobre su desempeño ambiental. El costo creciente de la energía, el diseño de procesos más intensivos y compactos, y la preocupación creciente por el medio ambiente, han hecho surgir la necesidad de emplear nuevos enfoques para el diseño y operación de procesos de obtención de bioetanol.

Se planteó el reto de la producción de bioetanol, a partir de material lignocelulósico de cáscaras de frutas, teniendo en cuenta como solución, la búsqueda de un proceso preliminar, incluyendo el diseño, análisis e implementación de tecnologías, logrando como alternativa una gestión integral de estos residuos sólidos orgánicos, y de cierta forma, minimizar la cantidad de desechos que se disponen en el relleno sanitario de la ciudad.

A través del análisis de las diferentes etapas (pretratamiento, hidrólisis, fermentación y separación), se determinó que el mejor rendimiento para las variables de respuesta del proceso, corresponde a la operación de los factores o efectos principales en sus valores de nivel más alto. Este resultado debe ser estimado teniendo en cuenta el posterior balance económico detallado del proceso.

En el presente trabajo, se observó que la experimentación realizada sobre la etapa de hidrólisis, en el conjunto de tratamientos efectuados para los dos factores

evaluados, el tiempo de retención de 25 min y temperatura de 160 °C, incrementan la eficiencia en la conversión de la holocelulosa en azúcares fermentables.

La mejor configuración operacional para el sistema de fermentación, se presenta cuando se trabaja con un valor constante de la temperatura de 33 °C y un tiempo de fermentación de 72 horas, sobre la cantidad de etanol obtenido.

La producción de etanol a partir de cáscaras de frutas es técnicamente factible, como se muestra en los resultados correspondientes a la etapa de separación; y es económicamente viable; mientras se recupere el ácido gastado, ya que este reactivo es imprescindible en el proceso y es también costoso, como se puede observar en el estudio económico.

Finalmente, teniendo en cuenta que el estudio realizado está enfocado al diseño preliminar de un proceso de obtención de etanol, se realizó la evaluación económica grosso modo, utilizando como base de cálculo una tonelada diaria de cáscaras de frutas, y éste arrojó una tasa interna de retorno (TIR) mayor que la tasa interna de oportunidad y un valor presente neto (VNP) mayor que cero, indicando que es financieramente factible realizar el proyecto a escala de planta piloto y mostrando que los costo de montaje y operación se pueden recuperar finalizando el tercer año de operación.

RECOMENDACIONES

Sin duda, uno de los mayores retos para aumentar el rendimiento del proceso de transformación de la biomasa lignocelulósica en etanol es la fermentación de todos los azúcares presentes en la biomasa (C_5 y C_6). Se debe trabajar intensamente en la obtención de microorganismos modificados genéticamente que puedan transformar las pentosas (xilosa, ribosa, anabirosa) en etanol. Como ejemplo, se puede citar la introducción de enzimas para la asimilación de xilosa y de la ruta de las pentosas fosfato en *Zymomona mobilis* (Zhang y col., 1995), cepas recombinantes de *E. coli* con genes de *Z. mobilis* para una conversión más eficiente de piruvato a etanol (Dien y col. 2000), e introducción de plásmidos con genes de xilosa reductasa y xilitol deshidrogenasa de *P. stipitis* en *Saccharomyces ssp* para la cofermentación eficiente de glucosa y xilosa (Ho y col., 1998).

Es necesaria la implementación de un proceso de bioconversión directa de la materia prima en alcohol, de la mano de la tecnología de obtención de microorganismos recombinantes, que constituyan una llave para abrir la puerta de la competitividad del etanol frente a los combustibles fósiles y que permita obtener una muy buena rentabilidad de los proyectos de inversión.

El futuro trabajo detallado debe buscar tiempos de pretratamiento, hidrólisis y fermentación más cortos. Deben medirse los factores y efectos que inhiben a los microorganismos en la etapa de fermentación, como también desarrollar correlaciones más estrictas de la cinética de la hidrólisis, prehidrólisis y fermentación. De igual forma se debe incluir el diseño congruente con las políticas y normatividades referentes al manejo del medio ambiente.

BIBLIOGRAFÍA

1. Anna Eliasson, Camilla Christensson, C. Fredrik Wahlbom, and Bärbel Hahn-Hägerdal. Anaerobic Xylose Fermentation by Recombinant *Saccharomyces cerevisiae* Carrying XYL1, XYL2, and XKS1 in Mineral Medium Chemostat Cultures. Department of Applied Microbiology, Lund University.
2. Arnold L. Demain,^{1*} Michael Newcomb,² and J. H. David Wu². Cellulase, *Saccharomyces*, and Ethanol. *Charles A. Dana Research Institute for Scientists Emeriti, Drew University, Madison, New Jersey,¹ and Department of Chemical Engineering, University of Rochester, Rochester, New York².*
3. ARNOLD, E. The constitution of sugar. London 1930.
4. Ballesteros I., Ballesteros M., Cabañas A., Carrasco J., Martín C., Negro M. J., Saez F., & Saez R. (1991) Selection of thermotolerant yeasts for simultaneous saccharification and fermentation (SSF) of cellulose to ethanol. *Appl. Biochem. Biotechnol.* 28/29: 307-15.
5. Bárbara Pacheco, Claudia. Síntesis de carboximetilcelulosa (CMC) a partir de plantas anuales. Universitat Rovira i Virgili. Departamento de Ingeniería Química. Memoria para optar al grado de Doctor en Ing. Qca. Tarragona 2002.
6. CHALELA ÁLVAREZ, Graciela. Producción de etanol a partir del almidón de papa mediante acción combinada con *Aspergillus niger* y *Saccharomyces cerevisiae*, y evaluación de los productos intermedios formados durante el bioproceso. UIS - 1997.
7. CHALELA ÁLVAREZ, Graciela. Bioobtención de Alcohol a partir de Residuos Celulósicos. Universidad Industrial de Santander. 2001
8. CRISTANCHO, Diego. Estudio del efecto del tiempo de retención hidráulico, la temperatura y el contenido en carga orgánica en el proceso de digestión anaerobia en dos fases de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos. Trabajo de grado de maestría – UIS 2005
9. DEMAINE, Arnold L.¹, NEWCOMB, Michael², and WU, J. H. David². Cellulase, *Clostridia*, and Etanol. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, March 2005, p. 124-154, Vol. 69, No. 1. Charles A. Dana Research Institute for

Scientists Emeriti, Drew University, Madison, New Jersey,¹ Department of Chemical Engineering, University of Rochester, Rochester, New York²

10. DUQUE, A.; Salguero, A. y SALAZAR, H. Etanol a partir de desechos agrícolas. Hidrólisis ácida de holocelulosa. Colombia 1979.
11. D. Peason. Laboratory Techniques in Food Analysis. Editorial Butterworth and Co. (Publishers) Ltd. London, Inglaterra.
12. FOCER, Fortalecimiento de la capacidad en energía renovable para América Central. Manuales sobre energía renovable: Biomasa/ Biomass. Costa Rica 2002
13. GAVIRIA SALAZAR, Enrique. Manual de Métodos Para el Control de Calidad de Bebidas Alcohólicas. Guía Técnica Colombiana GTC-4. ICONTEC.
14. HERMANS y WEIDINGER, J. Polymer Sci. 4:135 . 1950
15. MONTOYA, D., Spitia, S., Silvia, E. & Schwarz, W. (2000). Isolation of mesophilic solvent-producing strains from Colombia sources: Physiological characterization
16. OTT, C.; SPURLIN, H.M. y GRAFFIN, M. Cellulose and cellulose derivatives. 3 Vol., Intersc., N.Y. 1954.
17. PARÉS Y JUÁREZ. Bioquímica de los Microorganismos... Ed. Reverté, S.A. 1.997
18. PARSONS, CAROLINA; BANQUETH, EMMANUEL. Diseño de una planta piloto para la producción de etanol a partir de el bagazo de la caña de azúcar. Tesis de grado, UIS, 2004.
19. PRESCOTT AND DUNN'S. Industrial Microbiology Fourth Edition. 1.982. Gerald Reed. MacMillan Publishers Ltd.
20. P. Gunasekaran and K. Chandra Raj. Ethanol fermentation technology. Department of Microbial Technology, School of Biological Sciences, Madurai Kamaraj University, Madurai 625 021, India
21. Saha, B.C., Hayashi, K. Lignocellulose biodegradation and applications in biotechnology. American Chemical Society Symposium Series. April 1, 2004. p. 2-34.

22. Springer Berlin / Heidelberg. Fuel ethanol production from lignocellulose: a challenge for metabolic engineering and process integration. Applied Microbiology and Biotechnology Issue: Volume 56, Numbers 1-2
23. STOCKMAN, L. 1978. Biomass as an energy source. UNITAR conference on longterm energy resources. Montreal, Canada. 1978

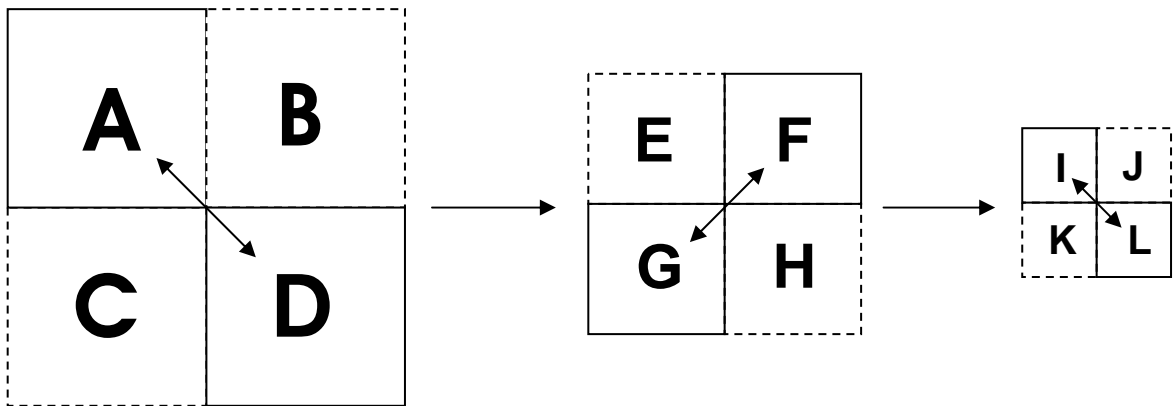
ANEXO A. MÉTODOS GENERALES Y CONSTITUYENTES BÁSICOS PARA EL ANÁLISIS DE ALIMENTOS.

DESMUESTRE

Antes de cada análisis debe prepararse cuidadosamente una muestra representativa de la sustancia. Ciertos elementos requieren una preparación especial.

Para nuestro caso contamos con cáscaras de frutas de diferentes clases, las cuales se recogieron previamente en los expendios de frutas de la plaza de mercado Guarín. Se dispuso entonces a preparar las muestras por cuarteo, de la siguiente manera,

- I. La cantidad de muestra se extiende formando un cuadrado que se divide en otros cuatro cuadros. Los cuadros B y C se rechazan. Los cuadros A y D se rechazan para dar II.
- II. Se opera de manera análoga a una I, rechazando las partes E y H; F y G se mezclan para dar III
- III. Se repite el proceso, se rechazan J y K y se mezclan I y L; se continúa así hasta obtener la cantidad adecuada de muestra.



Número de muestras

Se toma del conjunto del material un número suficiente de unidades de la sustancia hasta reunir la muestra deseada. Estas unidades se denomina individualmente “unidades de muestra” y colectivamente como “una muestra”. Con frecuencia, una muestra formada de varias partes se prepara a partir de un número seleccionado (n) de recipientes “unidad”. La expresión general es:

$$n = C\sqrt{N}$$

Donde n es la población y C es un factor relacionado con el grado deseado de precisión y con la homogeneidad. Para una población homogénea C es menor de 1, pero llega a ser mayor que la unidad conforme la heterogeneidad aumenta.

Norma

Guía Técnica Colombiana GTC 4 ICONTEC

Del griego *sákchar* σακχαρ-αρος (latín *saccharum*, azúcar) y *mykes* μυκης (hongo) y del latín *cerevisia* (cerveza)

Descripción micológica

Hongo levaduriforme que presenta células alargadas, globosas a elipsoidales con gemaciones o blastoconidios multilaterales (de 3-10 x 4,5-1 μm) (Figuras 73 y 74). Ascos con hasta cuatro ascosporas esféricas o elipsoides y de pared lisa en su interior.

Las colonias en agar glucosado de Sabouraud son cremosas, blandas y glabras como las formadas por *Candida* (Figura 75).

Ecología y enfermedad humana

Saccharomyces cerevisiae ("levadura de la cerveza") es un hongo ambiental común y es un componente transitorio de las microbiotas digestiva y cutánea humanas. Se utiliza ampliamente en la elaboración de vino, cerveza, pan y otros alimentos. Se han descrito casos de fungemia y endocarditis en pacientes con neoplasias (leucemias), receptores de trasplantes o infectados por el VIH y peritonitis en pacientes en diálisis ambulatoria crónica. También se le ha asociado con vulvovaginitis indistinguibles de las producidas por *Candida*. Se aísla con frecuencia en muestras fecales de receptores de trasplante de médula ósea. *Saccharomyces cerevisiae* (como *Saccharomyces boulardii*) se ha empleado en el tratamiento de problemas gastrointestinales con presencia de diarrea.

Posición taxonómica

Phylum: *Ascomycota*
Clase: *Hemiascomycetes*
Orden: *Saccharomycetales*
Familia: *Saccharomycetaceae*

Sinónimo

Saccharomyces boulardii

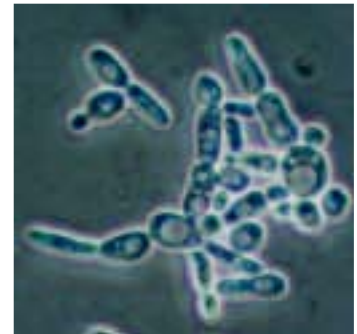


Figura A. Levaduras de *Saccharomyces cerevisiae*. Microscopía de contraste de fases, x580 aumentos.

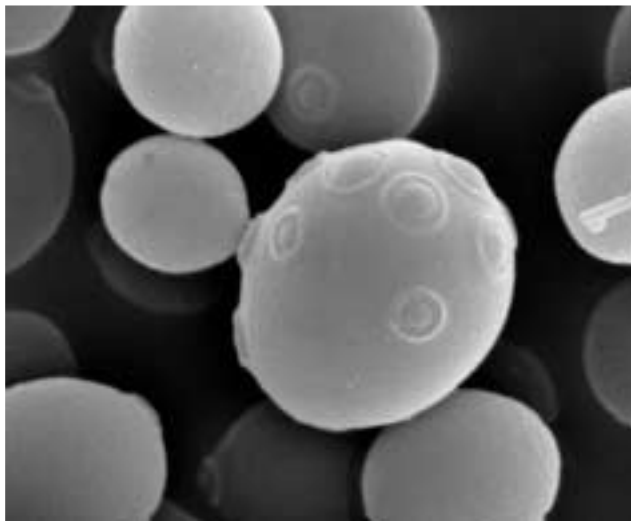


Figura B. Levaduras de *Saccharomyces cerevisiae*. Microscopía electrónica de barrido, x7040 aumentos.

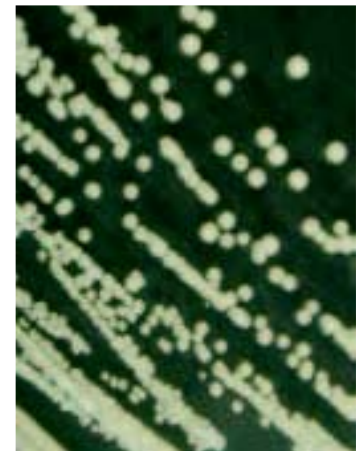
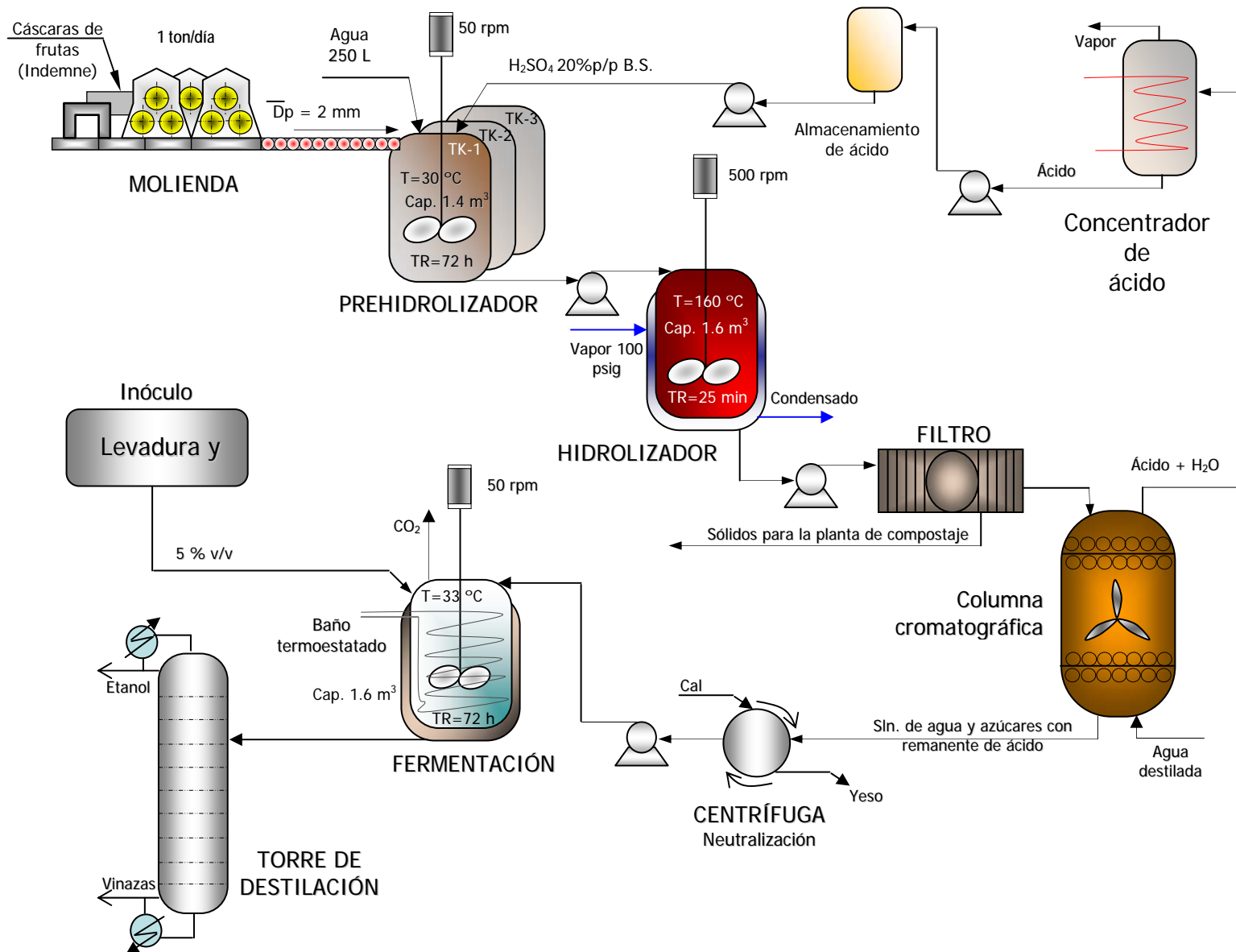


Figura C. Crecimiento de *Saccharomyces cerevisiae* en agar glucosado de Sabouraud durante 2 días a 24 °C.

ANEXO C. DIAGRAMA DE FLUJO PARA EL DESARROLLO DEL PROCESO EN PLANTA PILOTO



ANEXO D. EXPECIFICACIONES DE LOS EQUIPOS PARA ADECUACIÓN DE LA MATERIA PRIMA

EQUIPO	MOLINO DE DISCOS	PLANTA PILOTO	PRODUCCIÓN DE ETANOL A PARTIR DE CÁSCARAS DE FRUTAS
DESCRIPCIÓN			
MATERIAL: ACERO AL CARBÓN			
CONDICIONES DE OPERACIÓN			
TEMPERATURA (°C)		28	
PRESIÓN (ATM)		1	
CORRIENTES DEL EQUIPO			
ENTRADA	BAGAZO	SALIDA	BAGAZO 2 – 3 mm
ESPECIFICACIONES DEL EQUIPO			
NÚMERO DE CUCHILLAS DEL ROTOR		7 X 2 / 9 X 2	
NÚMERO DE CUCHILLAS DEL ROTOR		2/3	
DIAMETRO DEL ROTOR		0.3 M	
ANCHO DEL ROTOR		1.2 M	
ABERTURA DE CAMARA DE CORTE		0.6 X 0.5M	
POTENCIA 65 KW		65 KW	
DIMENSIONES DEL EQUIPO			
LONGITUD B		1.2 M	
ANCHO B		1.5 M	
ANCHO D		0,8 M	
ANCHO E		0,6 M	

PRE-HIDRÓLISIS			
EQUIPO	PRE-HIDROLIZADOR	PLANTA PILOTO	PRODUCCIÓN DE ETANOL A PARTIR DE CÁSCARAS DE FRUTAS
SERVICIO	TRANSFORMAR LA HEMICELULOSA EN XILOSA		
DESCRIPCIÓN			
MATERIAL: ACERO AL CARBÓN			
CONDICIONES DE OPERACIÓN			
TEMPERATURA		25 ° C	
PRESIÓN		1 atm	
AGITACIÓN		50 rpm	
TIEMPO DE RESIDENCIA		72 h	
CORRIENTES DEL EQUIPO			
ENTRADA	CELULOSA, HEMICELULOSA, LIGNINA, H ₂ O Y H ₂ SO ₄	SALIDA	XILOSA, CELULOSA, LIGNINA, H ₂ SO ₄ , H ₂ O
DIMENSIONES DEL EQUIPO			
DIÁMETRO		1 m	
ALTURA		1.783 m	
VOLUMEN		1.4 m ³	

HIDRÓLISIS			
EQUIPO	PRE-HIDROLIZADOR	PLANTA PILOTO	PRODUCCIÓN DE ETANOL A PARTIR DE CÁSCARAS DE FRUTAS
SERVICIO	TRANSFORMAR LA HEMICELULOSA EN XILOSA		
DESCRIPCIÓN			
MATERIAL: ACERO AL CARBÓN			
CONDICIONES DE OPERACIÓN			
TEMPERATURA		160 ° C	
PRESIÓN		90 psig	
AGITACIÓN		500 rpm	
TIEMPO DE RESIDENCIA		25 min	
CORRIENTES DEL EQUIPO			
ENTRADA	CELULOSA, HEMICELULOSA, LIGNINA, H ₂ O Y H ₂ SO ₄	SALIDA	XILOSA, CELULOSA, LIGNINA, H ₂ SO ₄ ,

			H ₂ O
DIMENSIONES DEL EQUIPO			
	DIÁMETRO		1 m
	ALTURA		1.684 m
	VOLUMEN		1.6 m ³

FERMENTACIÓN			
EQUIPO	FERMENTADOR	PLANTA PILOTO	PRODUCCIÓN DE ETANOL A PARTIR DE CÁSCARAS DE FRUTAS
SERVICIO	TRANSFORMAR LA GLUCOSA Y XILOSA EN ETANOL		
DESCRIPCIÓN			
MATERIAL: ACERO AL CARBÓN			
CONDICIONES DE OPERACIÓN			
	TEMPERATURA		33 °C
	PRESIÓN		1 atm
	AGITACIÓN		50 rpm
	pH		4.2 – 4.8
	TIEMPO DE RESIDENCIA		72 h
CORRIENTES DEL EQUIPO			
ENTRADA	GLUCOSA, XILOSA, H ₂ O	SALIDA	ETANOL, H ₂ O, CO ₂
DIMENSIONES DEL EQUIPO			
	DIÁMETRO		0.55 m
	ALTURA		1. m
	VOLUMEN		1.6 m ³

SEPARACIÓN DEL YESO			
EQUIPO	CENTRÍFUGA	PLANTA PILOTO	PRODUCCIÓN DE ETANOL A PARTIR DE CÁSCARAS DE FRUTAS
SERVICIO	RETIRAR EL YESO FORMADO AL AGREGAR LA CAL		
DESCRIPCIÓN			
MATERIAL: ACERO AL CARBÓN			
CONDICIONES DE OPERACIÓN			
	TEMPERATURA		28 ° C
	PRESIÓN		1 ATM

TIEMPO		24 MIN	
CORRIENTES DEL EQUIPO			
ENTRADA	XILOSA, GLUCOSA, H ₂ O Y CAL	SALIDA	XILOSA, GLUCOSA, AGUA Y YESO
DIMENSIONES DEL EQUIPO			
DIÁMETRO		1.6 M	
LONGITUD		1.2 M	
VOLUMEN		0.246 M ³	
REMOCIÓN DE LA LIGNINA			
EQUIPO	FILTRO	PLANTA PILOTO	PRODUCCIÓN DE ETANOL A PARTIR DE CÁSCARAS DE FRUTAS
SERVICIO	REMOVER LA LIGNINA REMANENTE DESPUÉS DE LA HIDRÓLISIS		
DESCRIPCIÓN			
MATERIAL: ACERO AL CARBÓN			
CONDICIONES DE OPERACIÓN			
TEMPERATURA		28 ° C	
VOLUMEN DE FILTRADO		0.1431 M ³	
MASA DE LA TORTA		8.36 KG	
TIEMPO		3.4 MIN	
CORRIENTES DEL EQUIPO			
ENTRADA	XILOSA, GLUCOSA, LIGNINA Y H ₂ O	SALIDA	XILOSA, GLUCOSA, AGUA Y LIGNINA A ELIMINAR
DIMENSIONES DEL EQUIPO			
DIÁMETRO		1.6 M	
LONGITUD		1.2 M	

SEPARACIÓN Y RECIRCULACIÓN DEL ÁCIDO			
EQUIPO	EQUIPO DE SEPARACIÓN CROMATOGRÁFICA	PLANTA PILOTO	PRODUCCIÓN DE ETANOL A PARTIR DE CÁSCARAS DE FRUTAS
SERVICIO	SEPARAR Y RECIRCULAR EL ACIDO CON RESINAS DE INTERCAMBIO IONICO		
MATERIAL: VIDRIO			
CONDICIONES DE OPERACIÓN			
TEMPERATURA		28 ° C	

CAÍDA DE PRESIÓN		1.2 ATM	
TIEMPO		24 MIN	
CORRIENTES DEL EQUIPO			
ENTRADA	XILOSA, GLUCOSA, H ₂ SO ₄ Y AGUA	SALIDA	XILOSA, GLUCOSA, AGUA Y H ₂ SO ₄ A RECIRCULAR
DIMENSIONES DEL EQUIPO			
DIÁMETRO		0.1 M	
LONGITUD		1.2 M	
VOLUMEN		0.246 M ³	

ANEXO E EVALUACIÓN ECONÓMICA PRELIMINAR DEL PROCESO DE OBTENCIÓN DE ETANOL A PARTIR DE MATERIAL LIGNOCELULÓSICO DE CÁSCARAS DE FRUTAS

En este trabajo se realizó la evaluación económica del proceso de obtención de etanol a partir de material lignocelulósico de cáscaras de frutas, encontrándose que para las condiciones actuales del país el proceso es factible económicamente.

El escenario de modelamiento está basado en la forma como se llevaría a cabo este proyecto. La evaluación se tomó haciendo referencia al montaje de una planta piloto, y bajo esta característica, el hecho de establecerla no solo conlleva beneficios para la academia, sino que se convierte en una solución importante en la disposición de los residuos sólidos de frutas.

El tiempo de evaluación del proyecto es de 10 años. El año cero corresponde al momento de partida en cuanto al funcionamiento de la planta, con una producción al 100% de la capacidad, sin proyección de crecimiento en cuanto a los niveles de producción debido a los limitantes técnicos inherentes a las capacidades de los equipos.

A continuación se presenta los resultados correspondientes al análisis económico del proceso:

CANTIDAD Y COSTO DE MATERIA PRIMA Y PRODUCTOS

Productos		Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9
Etanol											
Ventas litros/mes	1200	14400									
Precio \$/Litro	4500	64800000	67469760	70249514,11	73143794,09	76157318,41	79294999,93	82561953,93	85963506,43	89505202,89	93192817,25
Abono											
Ventas kg/mes	30000	360000									
Precio \$/kg	280	100800000	104952960	109277022	113779235,3	118466939,7	123347777,7	128429706,1	133721010	139230315,6	144966604,6
Yeso											
Ventas kg/mes	20	240									
Precio \$/kg	15000	3600000	3748320	3902750,784	4063544,116	4230962,134	4405277,774	4586775,218	4775750,357	4972511,272	5177378,736
Total venta de productos		169200000	176171040	183429286,8	190986573,5	198855220,3	207048055,4	215578435,3	224460266,8	233708029,8	243336800,6
Materia prima											
kg cáscaras de frutas	30000	360000									
Precio \$/kg cáscaras	5	1800000	1874160	1951375,392	2031772,058	2115481,067	2202638,887	2293387,609	2387875,179	2486255,636	2588689,368
kg cal	30	360									
Precio \$/kg cal	1300	468000	487281,6	507357,6019	528260,7351	550025,0774	572686,1106	596280,7784	620847,5464	646426,4653	673059,2357
Litros H2SO4		60	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Precio \$/litro H2SO4	8750	525000	91105	94858,526	98766,69727	102835,8852	107072,7237	111484,1199	116077,2656	120859,649	125839,0665
Cantidad Resina (Unidad)	1	1									
Precio \$ Resina		6000000	6247200	6504584,64	6772573,527	7051603,556	7342129,623	7644625,363	7959583,928	8287518,786	8628964,56
Costo Total Materia Prima		8793000	8699746,6	9058176,16	9431373,018	9819945,586	10224527,34	10645777,87	11084383,92	11541060,54	12016552,23

DETALLE DEL PLAN DE INVERSIÓN

PLAN DE INVERSIÓN		
Equipo principal Comprado		98.000.000,00
Instalación Equipo Comprado		6.450.000,00
Redes eléctricas, tuberías y accesorios		10.000.000,00
Terreno		40.000.000,00
Acondicionamiento terreno y áreas de operación		25.000.000,00
Muebles y equipos de oficina		7.000.000,00
Total Inversión Fija		186.450.000,00
Capital de trabajo		10.000.000,00
Efectivo		2.500.000,00
Inventario de materias primas		1.400.000,00
Total Inversión		200.350.000,00
Crédito	50%	100.175.000,00
Capital	50%	100.175.000,00
Amortización		10 años

Parámetros

Inflación (ano 0 – año 9) = 4.12%

Incremento en salarios= 4.12%

Salario Mínimo legal vigente = 408000

DETALLE DEL CRÉDITO

Cantidad solicitada : \$100,175,000.00

Plazo Total : 120 meses

Periodicidad Amortización : Anual

Tasa de interés equivalente 13.85 % Anual Año Vencido

Número de cuotas al año : 1

Número Total de cuotas : 10

Cuota No.	Capital	Intereses	Total	Saldo Capital
1	10.017.500,00	13.874.237,50	23.891.737,50	90.157.500,00
2	10.017.500,00	12.486.813,75	22.504.313,75	80.140.000,00
3	10.017.500,00	11.099.390,00	21.116.890,00	70.122.500,00
4	10.017.500,00	9.711.966,25	19.729.466,25	60.105.000,00
5	10.017.500,00	8.324.542,50	18.342.042,50	50.087.500,00
6	10.017.500,00	6.937.118,75	16.954.618,75	40.070.000,00
7	10.017.500,00	5.549.695,00	15.567.195,00	30.052.500,00
8	10.017.500,00	4.162.271,25	14.179.771,25	20.035.000,00
9	10.017.500,00	2.774.847,50	12.792.347,50	10.017.500,00
10	10.017.500,00	1.387.423,75	11.404.923,75	-

COSTO DE PRODUCCIÓN Y COSTO DE VENTA

	\$/MES	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9
Compra materia prima		8793000	8699746,6	9058176,16	9431373,018	9819945,586	10224527,34	10645777,87	11084383,92	11541060,54	12016552,23
° Mano de obra directa		9792000	10195430,4	10615482,13	11052840	11508217	11982355,54	12476028,59	12990040,97	13525230,66	14082470,16
° Gastos de fabricación		2000000	2082400	2168194,88	2257524,509	2350534,519	2447376,541	2548208,454	2653194,643	2762506,262	2876321,52
Depreciación equipos, vehículos y construcciones		15000000	15618000	16261461,6	16931433,82	17629008,89	18355324,06	19111563,41	19898959,82	20718796,97	21572411,4
Servicios Industriales	400000	4800000	4997760	5203667,712	5418058,822	5641282,845	5873703,698	6115700,291	6367667,143	6630015,029	6903171,648
Mantenimiento	200000	2400000	2498880	2601833,856	2709029,411	2820641,423	2936851,849	3057850,145	3183833,571	3315007,515	3451585,824
Total Costo Manufactura		27785000	28474217	29647354,74	30868825,76	32140621,38	33464814,98	34843565,35	36279120,25	37773820	39330101,39

ESTADO DE PÉRDIDAS Y GANANCIAS

		Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9
Total ventas		169200000	176171040	183429286,8	190986573,5	198855220,3	207048055,4	215578435,3	224460266,8	233708029,8	243336800,6
Costo de ventas		27785000	28474217	29647354,74	30868825,76	32140621,38	33464814,98	34843565,35	36279120,25	37773820	39330101,39
Utilidad Bruta		141415000	147696823	153781932,1	160117747,7	166714598,9	173583240,4	180734869,9	188181146,5	195934209,8	204006699,2
Gastos administrativos		12000000	12494400	13009169,28	13545147,05	14103207,11	14684259,25	15289250,73	15919167,86	16575037,57	17257929,12
Prestaciones empleados		25637405,28	26693666,38	27793445,43	28938535,38	30130803,04	31372192,13	32664726,44	34010513,17	35411746,32	36870710,26
Gastos generales de administración y ventas		4896000	5097715,2	5307741,066	5526419,998	5754108,502	5991177,772	6238014,297	6495020,486	6762615,33	7041235,081
Utilidades operacionales		98881595	103411041	107671576,3	112107645,3	116726480,3	121535611,2	126542878,4	131756445	137184810,6	142836824,8
Intereses de crédito	0,1385	13874237,5	12486813,75	11099390	9711966,25	8324542,5	6937118,75	5549695	4162271,25	2774847,5	1387423,75
Crédito del proyecto	100175000										
Utilidades antes de impuestos		85007357	90924227,7	96572186,33	102395679	108401937,8	114598492,5	120993183,4	127594173,8	134409963,1	141449401
Impuestos	35%	29752575,03	31823479,69	33800265,22	35838487,66	37940678,22	40109472,37	42347614,2	44657960,82	47043487,07	49507290,35
Utilidad Neta		55254782	59100748	62771921,11	66557191,37	70461259,54	74489020,12	78645569,23	82936212,95	87366475,99	91942110,65

FLUJO DE FONDOS

	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10
FUENTES											
Utilidad Neta		55254782	59100748	62771921,11	66557191	70461260	74489020	78645569,23	82936212,95	87366475,99	91942110,65
Depreciación		15000000	15000000	15000000	15000000	15000000	15000000	15000000	15000000	15000000	15000000
Capital	100175000										
Créditos a largo plazo	100175000										
Total Fuentes	200350000	70254782	74100748	77771921,11	81557191	85461260	89489020	93645569,23	97936212,95	102366476	106942110,7
USOS											
Activo Fijo	186450000										
Activo Corriente	10000000										
Amortización crédito	10017500	10017500	10017500	10017500	10017500	10017500	10017500	10017500	10017500	10017500	10017500
Total Usos	206467500	10017500	10017500	10017500	10017500	10017500	10017500	10017500	10017500	10017500	10017500
SUPERÁVIT O DEFICIT											
	-10017500	60237282	64083248	67754421,11	71539691	75443760	79471520	83628069,23	87918712,95	92348975,99	96924610,65
Saldo anterior caja	0	10017500	50219782	114303030,2	182057451	253597143	329040902	408512422,3	492140491,6	580059204,5	672408180,5
SALDO FINAL CAJA	-10017500	50219782	114303030	182057451,3	253597143	329040902	408512422	492140491,6	580059204,5	672408180,5	769332791,1

TASA INTERNA DE RETORNO (TIR) Y VALOR PRESENTE NETO (VPN)

	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10	
VPN= 275730838,5	-137622515,9	-78549853,28	-23193336	28637733,54	77130747,33	122468669,9	164829169,7	204383963,5	241298341	275730838,5	
	-200350000	70254782,19	74100747,99	77771921,11	81557191,37	85461259,54	89489020,12	93645569,23	97936212,95	102366476	106942110,7
TIR= 37,75%		TIO= 12,00%									

ANEXO F RESULTADOS OBTENIDOS PARA CADA UNO DE LOS DISEÑOS EXPERIMENTALES

Diseño experimental 2⁵

Tamaño de partícula	Tiempo de retención	%p H2SO4	Relación Sustrato Agua	Temperatura	°Brix
1	1	1	1	1	2,4
1	1	1	1	2	2,8
1	1	1	2	1	3,1
1	1	1	2	2	3,7
1	1	2	1	1	4
1	1	2	1	2	3,9
1	1	2	2	1	4,6
1	1	2	2	2	5,2
1	2	1	1	1	4,1
1	2	1	1	2	4,3
1	2	1	2	1	5
1	2	1	2	2	4,8
1	2	2	1	1	5,9
1	2	2	1	2	6,4
1	2	2	2	1	6,7
1	2	2	2	2	7,2
2	1	1	1	1	3,9
2	1	1	1	2	4,2
2	1	1	2	1	5,4
2	1	1	2	2	6
2	1	2	1	1	5,2
2	1	2	1	2	7,3
2	1	2	2	1	7,2
2	1	2	2	2	8,3
2	2	1	1	1	5,2
2	2	1	1	2	5,1
2	2	1	2	1	5,9
2	2	1	2	2	6,4
2	2	2	1	1	7,5
2	2	2	1	2	9,8
2	2	2	2	1	9,8
2	2	2	2	2	10,8

Diseño 2²

Temperatura	Tiempo de residencia	°Brix
1	1	8,1
1	1	7,9
1	2	10,4
1	2	10,6
2	1	9,8
2	1	9,4
2	2	11,8
2	2	11,5