



Universidad Nacional Autónoma
de México

Facultad de Estudios Superiores
GUAUTITLAN



FALLA DE ORIGEN

**Optimización de las Condiciones de Operación para
la Clarificación y Decoloración de Jarabe a 60° Bx
Elaborado con Azúcar Estándar.**

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO EN ALIMENTOS
P R E S E N T A :
ENRIQUE ANTONIO LUNA GONZALEZ

Directora: I. A. LAURA M. CORTAZAR FIGUEROA

Coasesor: IBQ FERNANDO BERISTAIN

Cuautitlán Izcalli, Edo. de Méx.

1995



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN
UNIDAD DE LA ADMINISTRACION ESCOLAR
DEPARTAMENTO DE EXAMENES PROFESIONALES

U. N. A. M.
FACULTAD DE ESTUDIOS
SUPERIORES CUAUTITLAN

ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS



Departamento de
Exámenes Profesionales

DR. JAIME KELLER TORRES
DIRECTOR DE LA FES-CUAUTITLAN
P R E S E N T E .

AT'N: Ing. Rafael Rodríguez Ceballos
Jefe del Departamento de Exámenes
Profesionales de la F.E.S. - C.

Con base en el art. 28 del Reglamento General de Exámenes, nos permitimos comunicar a usted que revisamos la TESIS TITULADA:

"Optimización de las condiciones de operación para la clari-

ficación y decoloración de jarabe a 60 °Bx elaborado con
azúcar estándar"

que presenta el pasante: Enrique Antonio Luna González

con número de cuenta: 8237031-0 para obtener el TÍTULO de:
Ingeniero en Alimentos

Considerando que dicha tesis reúne los requisitos necesarios para ser discutida en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO.

A T E N T A M E N T E .

"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

Cuatitlán Izcalli, Edo. de Méx., a 23 de Noviembre de 1974

PRESIDENTE	I.Q. Alvaro Leo Ramírez
VOCAL	I.B.Q. Norma Casas Alencaster
SECRETARIO	I.A. Laura M. Cortazar Figueroa
PRIMER SUPLENTE	Dra. Sara E. Valdés Martínez
SEGUNDO SUPLENTE	I.A. Ediltrudis Estrada Lucas

[Firma]
[Firma]
[Firma]
[Firma]
[Firma]

A mis Padres...

Ma. Dolores González y Enrique Luna

A mis Hermanos...

Néstor

Oscar

Georgina

Isela

Agradecimiento especial a la
Ing. Laura M. Cortazar Figueroa
Por su invaluable apoyo en la
realización de esta tesis.

Al Ing. Fernando Bristain
Por la valía de sus aportaciones
a esta tesis profesional.

Al jurado
Por la dedicación y profesionalismo
en la revisión de este trabajo.

*Al Ing. Juan Mendoza Delgado
Por su confianza y apoyo en el
inicio de mi desarrollo profesional.*

*A mis compañeros y amigos
Mauro, Rosario, Alfonso, Claudia
Leonor, Manuel y Francisco.
Gracias por su apoyo
a lo largo de la carrera.*

INDICE GENERAL

	Página
RESUMEN	I
INTRODUCCIÓN	II
OBJETIVOS	III
CAPITULO I: Aspectos Generales	1
I.1. Generalidades	2
I.1.1. Antecedentes	2
I.1.2. Usos, Mercado y Distribución de Azúcar en México	7
I.1.3. Propiedades del Azúcar	9
I.1.4. Azúcar Granulado Características Físicas y Químicas	11
I.2. Refinación de Azúcar	13
I.2.1. Generalidades	13
I.2.2. Obtención del Azúcar Crudo	13
I.2.3. Obtención del Azúcar Refinado a partir de Azúcar Crudo	15
I.2.4. Clarificación	17
I.2.5. Decoloración	19
I.2.6. Decoloración con Adsorbentes de Carbón	20
I.2.7. Coadyuvantes de la Filtración	22
I.3. Metodología de Escalamiento	23
I.3.1. Fundamentos de Filtración	23
CAPITULO II: Desarrollo Experimental y Resultados	27
II. Desarrollo Experimental	28
II.1. Primera Fase Experimental	28
II.1.1. Experimento 1	31
II.1.2. Experimento 2	36
II.1.3. Experimento 3	41
II.2. Segunda Fase Experimental	45
II.2.1. Experimento 4	47
II.2.2. Experimento 5	54

II.3. Tercera Fase Experimental	59
II.3.1. Experimento 6	61
II.3.2. Experimento 7	68
II.3.3. Experimento 8	75
II.3.4. Experimento 9	81
II.3.5. Experimento 10	87
CAPITULO III: Escalamiento y Justificación Económica	93
III.1. Escalamiento	94
III.2. Justificación Económica	96
III.2.1. Costos	99
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	102
APÉNDICES	105
APÉNDICE I: MÉTODOS ANALÍTICOS	105
APÉNDICE II: MÉTODOS ESTADÍSTICOS	108
BIBLIOGRAFÍA	110
ÍNDICE DE MATERIAS	IV

RESUMEN

En el presente trabajo se propone la sustitución de azúcar refinada por azúcar estándar como ingrediente en la elaboración de productos derivados de las frutas y hortalizas, como conservas, jugos, néctares, bebidas refrescantes, etc. Esta opción se expone como alternativa a las empresas de este sector de la industria alimentaria, que han sufrido diversos problemas como consecuencia de la falta de abasto de azúcar refinada. Así mismo, se obtiene una reducción en los costos de manufactura.

El proyecto se dividió en tres etapas; la primera de ellas consiste en la documentación e investigación de aspectos estadísticos y sociales de la industria azucarera en México, así como también aspectos teóricos de refinación que abarca entre otras, a las operaciones de decoloración y clarificación de azúcar, además de la identificación de los compuestos y coadyuvantes de la filtración más empleados en estas operaciones.

La segunda etapa es la fase experimental del proyecto que consistió en determinar las mejores condiciones de decoloración y clarificación para el jarabe de azúcar estándar a 60 °Bx. Estas para la decoloración fueron: Carbón activado al 0.25% con respecto a los sólidos de azúcar, temperatura de 80-85°C por 15 minutos.

Para la clarificación por filtración a presión: Hy flo supercel como coadyuvante de la filtración, en precapa al 0.85 kg/m² y en dosificación al 1.93 kg/m³. Bajo estas condiciones se obtiene; jarabe con un índice ICUMSA de color por absorbancia de 250 unidades, lo cual es aceptable ya que con azúcar refinada en condiciones semejantes se obtiene un índice de 229 unidades, por lo cual se podría emplear el azúcar estándar sin restricción alguna.

En la tercera etapa se realizó la justificación económica del proyecto, la cual se lleva a cabo para una empresa con un consumo de 55 toneladas por día, el rendimiento bruto de la inversión se estima en 778% anual.

INTRODUCCIÓN

Durante los últimos años la industria azucarera ha vivido en crisis debido a los graves problemas económicos y políticos generados durante la administración estatal. Ahora, ya privatizados, la mayoría de los ingenios están en quiebra y muchas familias dependen de la actividad de estas empresas, por lo que cualquier desplome del sector azucarero sería desastroso.

Particularmente la industria manufacturera, donde el azúcar es una importante materia prima, ha padecido en muchas ocasiones el desabasto de este material. El sector refresquero, más poderoso económicamente ha ido superando los problemas mediante la compra de ingenios azucareros para su abasto, sin embargo no todas las industrias tienen esa ventaja. Emplear azúcar estándar como edulcorante podría ser benéfico, debido a la reducción del costo por esta materia prima.

La tecnología de refinación de azúcar se encuentra disponible y solo es necesario adecuarla a las necesidades propias del sector manufacturero de frutas y hortalizas.

Por lo anterior, se puede resumir la problemática a resolver como:

" Sustituir el azúcar refinada por azúcar estándar como edulcorante en la elaboración de productos derivados de las frutas y hortalizas. "

Para la solución a este problema que originó el presente trabajo de investigación, se plantearon los siguientes objetivos:

OBJETIVOS

Objetivo General

Evaluar el efecto de las condiciones de operación, optimizando el proceso de clarificación y decoloración de jarabe de azúcar estándar a 60 °Bx, a partir de datos obtenidos en el laboratorio para el escalamiento a nivel industrial, así como la justificación económica del proceso.

Objetivos Particulares

- Evaluar el efecto de las condiciones de operación en la clarificación y decoloración de jarabe de azúcar estándar a 60 °Bx a partir de equipo de laboratorio y piloto.
- Establecer las condiciones óptimas de las operaciones de clarificación y decoloración, a partir de las características del producto final.
- Escalar el proceso a nivel industrial a partir de las condiciones de operación encontradas a nivel piloto.
- Realizar la justificación económica del proceso de clarificación y decoloración de jarabe de azúcar a 60 °Bx.

CAPITULO I

Aspectos Generales

I.1. Generalidades

I.1.1. Antecedentes

El azúcar es uno de los productos más antiguos que se conocen, su obtención se remonta a más de 12,000 años en el territorio de Nueva Guinea. En América, fue introducida por Cristóbal Colón a República Dominicana y Haití en el año 1509 D.C., más tarde en México, Brasil, Cuba, y Venezuela.

El azúcar como producto agrícola constituye una importante fuente de energía en la dieta humana, su consumo puede hacerse en forma directa, y/o indirecta en los productos manufacturados por las industrias de alimentos, farmacéutica, etc. En el cuadro 1 se indica el consumo anual per cápita de algunos países, según la United States Department of Agriculture, U.S.D.A. [1,4,20].

Cuadro 1 Consumo *per* cápita de azúcar en algunos países (kg/año).

Barbados	64	U.R.S.S.	44
Costa Rica	60	Libia	43
Bulgaria	56	Dinamarca	42
Cuba	56	Inglaterra	42
Fidji	56	Panamá	42
Australia	55	Sudáfrica	41
México	52	Canadá	40
Nueva Zelanda	51	Arabia Saudita	37
Brasil	50	Argentina	36
Venezuela	49	Colombia	35
Israel	48	E.U.A	35
Polonia	48	Egipto	32
Singapur	48	Japón	23

Fuente: U.S.D.A 1990.

México, se ubica entre los países con mayor consumo de azúcar por habitante, como se puede apreciar en el cuadro 1, también en esta lista se encuentran grandes productores como Cuba, Brasil, y Australia. Una de las razones por las que nuestro país pertenece a este grupo, se debe a la variedad de usos que el azúcar posee, además del profundo arraigo en nuestras tradiciones y en general en nuestra vida cotidiana [2,9,25].

De los países considerados como importantes productores de azúcar destacan: Alemania, Australia, Brasil, Cuba, Estados Unidos, Francia, India, México República Popular China, y la URSS, en estas naciones el cultivo y la obtención del azúcar es una importante actividad económica, en la figura 1 se ilustra la posición de los principales países productores de azúcar de acuerdo al volumen anual de producción de los últimos años [1,4,12].

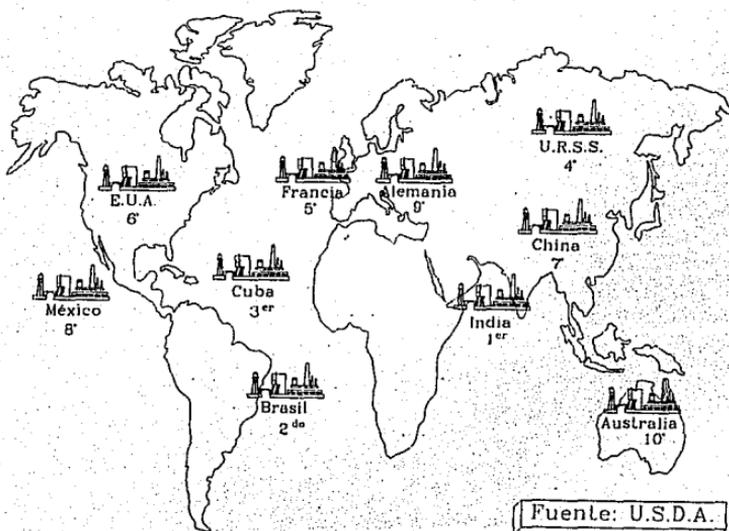
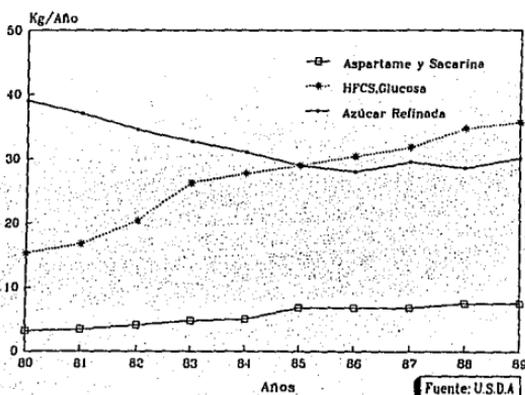


Figura 1 Principales productores de azúcar en el mundo.

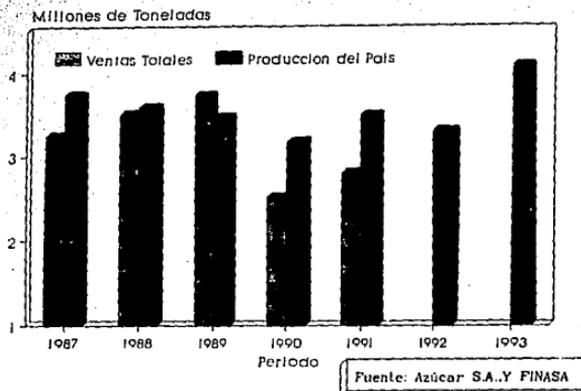
De 1985 a 1992 la industria azucarera mundial, ha presentado muchos cambios en el precio y volumen de sus productos, debido a la incertidumbre que ha dominado el mercado, periodos deficitarios y de superhabilit que se han conjuntado para hacer impredecible el comportamiento del mercado del azúcar etc. [4,20].

Las condiciones climatológicas han contribuido afectando la productividad, dando pie a la especulación, limitando el abasto y motivando el aumento de los precios de venta del producto [25]. Todo lo anterior ha incrementado la búsqueda de alternativas tecnológicas en el uso de edulcorantes para la manufactura de productos alimenticios, tales como el jarabe invertido de maíz de alto contenido en fructosa (high fructose corn syrup H.F.C.S) y otros de bajo potencial calórico, como ha sucedido en Estados Unidos y países de la Comunidad Económica Europea [4,20]. En la gráfica 1 se observa esta disminución en el consumo de azúcar en Estados Unidos [20].



Gráfica 1 Consumo de edulcorantes en Estados Unidos.

Nuestro país no ha estado aislado de los cambios en los precios que afectan económicamente a la industria y al consumidor final. Con 63 ingenios, en México se producen aproximadamente 3,650 millones de toneladas al año, con varios grados de calidad y destino [2,9]. Los estados de mayor producción de azúcar son: Veracruz, Jalisco, San Luis Potosí y Oaxaca, donde se genera más del 65% de la producción del país [2,9]. En la gráfica 2 se ilustra la producción y ventas en el país, donde se puede notar un desplome en la producción de azúcar en los años de 1990 a 1992 [2,9,25].



Gráfica 2 Producción y comercialización de azúcar en México.

En 1983 el gobierno de México intervino, creando la paraestatal *Azúcar, S.A.*, con lo que se pretendió controlar el mercado y garantizar el abasto del producto, estructurando políticas que coordinaran las actividades de éste sector agropecuario, sin embargo, se originaron serios problemas financieros además de desabasto, ya que bajo la administración del estado, los ingenios acumularon cuantiosas pérdidas [2,25].

En 1990-1991 el gobierno mexicano decide vender los ingenios, cuando el sector atraviesa por la crisis más grave vivida en el país, ya que la mayoría de los ingenios carecen de recursos para invertir en infraestructura y tecnología, lo cual agravó las expectativas de este sector agropecuario [25]. Con la crisis encima, un gran número de empresas se vieron afectadas debido a la escasez de azúcar, razón por la cual la fracción azucarera se vio en la necesidad importar este producto. Sin embargo, errores en las expectativas acerca del déficit, llevaron al país a importar más azúcar del necesario, saturando el mercado y llevando a la industria a más problemas como falta de liquidez, de la cual no han podido salir adelante, teniendo a esta industria en una invariable crisis [2,25].

En 1992 la paraestatal Azúcar, S.A. desaparece como parte de una política de libre mercado, la regulación de los precios de venta para el consumidor y para la industria quedó a cargo de la Secretaría de Comercio y Fomento Industrial y la comisión de seguimiento del Pacto para la Estabilidad y Crecimiento Económico (P.E.C.E.) evitando así la especulación y fluctuación de los precios de este producto básico [25].

En Abril de 1994 el costo del azúcar queda aislado de la regulación de los organismos antes mencionados, apegándose más a una política de libre mercado, manifestándose así un aumento inmediato en el precio del azúcar. Es conveniente mencionar que, en 1994 la situación de los ingenios sigue siendo grave, y que más de 150,000 familias entre productores de caña y trabajadores de los ingenios dependen directamente de esta actividad, por lo tanto sería catastrófico para esta población, que el consumo de edulcorantes se dirigiera a otro tipo, diferente al del azúcar [25].

Tabla 1 Precios oficiales de venta en México a través del P.E.C.E.

Diario Oficial	Productos de los Ingenios Mayorero e Industrial	Menudeo
	NS/Ton	NS/kg
<i>Abril 1993</i>		
Refinado	1,790.5	2.1
Estándar	1,595.6	1.9
Mascabado	1,449.5	1.7
<i>Abril 1994</i>		
Refinado	2,200	2.4
Estándar	1,840	2.0

Fuente: Secretaría de Comercio y Fomento Industrial, (SECOFI) y la Comisión de Seguimiento del P.E.C.E. 1993-1994.

De la producción de azúcar se comercializan dos clases de granulados; azúcar blanca y estándar además de otros subproductos. En la tabla 1 se muestra los precios de venta de los azúcares producidos en el país, donde se nota una diferencia considerable entre el precio del azúcar refinada y el precio del azúcar estándar. Éste margen en los precios de venta, contribuye a favorecer el proyecto de sustitución de azúcar refinada por azúcar estándar.

1.1.2. Usos, Mercado y Distribución de Azúcar en México.

El azúcar posee distintos usos en la Industria, principalmente en la de Alimentos, Química, Bioquímica, y Farmacéutica. Una de las razones de esta diversidad es producto de las distintas propiedades funcionales del azúcar, muchas de ellas se presentan al mezclarse con los componentes de un alimento, afectando sus características físicas, químicas, fisicoquímicas, microbiológicas, texturales, conservación (regulando la actividad de agua A_w), además de las sensoriales de un alimento [20]. En el cuadro 2 se muestra los principales usos del azúcar.

Cuadro 2 Usos del azúcar.

<u>Usos en Alimentos</u>	<u>Usos Industriales</u>	<u>Distribución Menudeo</u>
Industrias de:	Producción de:	Abasto en:
Dulces y Confitería	Vitaminas	Supermercados
Conservas de Frutas	Levaduras	Tiendas y Comercios
Chocolates y Cacao	Proteínas	Restaurantes
Cereales	Alcohol, Éter, Ésteres	Oficinas
Productos Congelados	Ind. Farmacéutica	Almacenes Menores
Bebidas, etc.	Cosméticos	

Fuente: U.S.D.A.

Como saborizante, desarrolla el sabor y aroma de los productos en los que se encuentra, en la fabricación de derivados de frutas y vegetales, se ha demostrado que el azúcar contribuye incrementando la percepción y aceptación de estos atributos por el consumidor [7,20]. También se ha observado que contribuye a estabilizar el color del alimento aumentando su vida de anaquel [20].

Aunque la Tecnología de Alimentos se ha sofisticado día con día, de modo que se han podido sustituir el sabor como del maíz o del huevo en varios productos, sin embargo, en algunas frutas y vegetales ha sido difícil igualar las características que el azúcar confiere al sabor de estos alimentos [20]. El consumo anual de azúcar en el país es de 3.35 millones de toneladas, incluyendo azúcar estándar y azúcar refinada [9]. La adquisición de azúcar por la industria representa más del 50% del total, y se utiliza como materia prima en los procesos de la industria de alimentos y otras, el restante se ha destinado al consumo doméstico como se puede observar en la tabla 2 [9].

El comercio de azúcar estándar significa más del 55% del total de venta en el país, siendo el mercado doméstico su principal destino. El azúcar refinado se emplea principalmente en las industrias de alimentos y farmacéutica, debido a la necesidad de evitar cualquier alteración en las características organolépticas del producto por ejemplo; color, aroma y sabor [20]. En la tabla 2 se muestran los volúmenes de venta de azúcar por tipo, refinado y estándar en el país [9].

Tabla 2 Consumo de azúcar en México y por tipo.

	<u>Industrial</u>	<u>Refresqueras</u>	<u>Doméstico</u>	<u>Refinada</u>	<u>Estándar</u>
1986	1,088	625	1,471	1'148	2'040
1987	1,058	608	1,755	1'224	2'203
1988	1,110	638	1,755	1'837	1'673
1989	1,351	776	1,598	1'844	1'889
1990	648	372	1,488	1'031	1'461
1991	1,175	676	1,689	1'459	2'089

Miles de toneladas

Fuente: Azúcar S.A. y FINASA 1986-1991.

L1.3. Propiedades del Azúcar

Los carbohidratos son compuestos orgánicos naturales producidos por las plantas verdes mediante el proceso de fotosíntesis, los carbohidratos más simples son los monosacáridos, dos de los más importantes son la glucosa y la fructosa, ya que con la unión de estos forman al disacárido sacarosa. Existen también los oligosacáridos; compuestos de tres a diez moléculas unidas de monosacáridos; y cuando diez o más están unidos son llamados polisacáridos, de estos los más conocidos son el almidón y la celulosa los cuales poseen propiedades diferentes a pesar de estar constituidos por un solo tipo de monosacárido, la glucosa. En el cuadro 3 se presenta una lista de los carbohidratos más comunes desde el punto de vista alimenticio, así como la composición y fuente de cada uno [7].

Cuadro 3 Carbohidratos alimenticios usuales.

Tipo	Monosacáridos que los Componen	Alimentos como Fuente Común
<i>Polisacáridos</i>		
Almidón Dextrinas	D-Glucosa	Cereales, tubérculos, legumbres.
Celulosa	D-Glucosa	Paredes celulares vegetales y fibras.
Glucógeno	D-Glucosa	Hígado, tejido animal.
Hemicelulosa	D-Glucosa, L-Manosa, D-Xilosa, L-Arabinosa, Ac.D-Galacturónico, D-Galactosa, L-Ramnosa, etc.	Paredes celulares vegetales y fibra.
Pentosanas	L-Arabinosa, D-Xilosa	Hemicelulosas y sustancias pécticas
Substancias Pécticas	Ac. D-Galacturónico, L-Arabinosa, D-Galactosa, L-Ramnosa	Frutas, especialmente manzanas, pera, y cidra, tejocote, verduras.
<i>Oligosacáridos</i>		
Rafinosa, estaquirosa	D-Galactosa, D-Glucosa, D-Fructosa	Legumbres, cereales, tubérculos.
Fructosilucrosa	D-Fructosa, D-Glucosa	Cereales, cebolla, puerros.
Maltooligosacáridos	D-Glucosa	Amilodextrinas, malta, jarabe de almidón.
<i>Disacáridos</i>		
Sacarosa	D-Glucosa, D-Fructosa	Caña de azúcar y de remolacha, frutas, verduras, alimentos dulces.
Maltosa, isomaltosa	D-Glucosa	Jarabes de almidón, malta, miel
Lactosa	D-Galactosa, D-Glucosa	Leche, queso, productos lácteos.

El azúcar es uno de los carbohidratos más abundantes en la naturaleza y componente básico de la cadena alimenticia, su fórmula empírica es $C_{12}H_{22}O_{11}$, y su peso molecular 342.3 gr/mol. En la figura 2 se presenta la estructura del α -D-Glucopiranosil- β -Fructofuranósido o sacarosa, nombre asignado por la Unión Internacional de Química Pura y Aplicada (IUPAC).

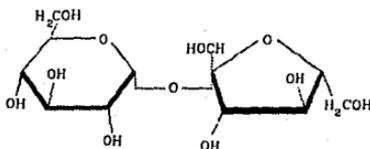


Figura 2 Estructura química de la molécula de sacarosa.

Propiedades Físicas

La sacarosa generalmente se emplea en forma sólida, siendo estable en su forma cristalina, con alto grado de pureza es incolora, inodora, de sabor dulce, es muy soluble en agua y en alcohol, por lo tanto es muy importante conocer la concentración de este material en solución, con lo que se han desarrollado métodos para su determinación, el más importante de estos es la escala Brix, la cual relaciona el porcentaje en peso de sacarosa pura en solución con agua. La viscosidad de las soluciones de azúcar, aumenta con el contenido de sólidos pero no en forma lineal, disminuyendo rápidamente con el incremento de la temperatura y disminución de la pureza [20]. Existen tablas que relacionan pureza, temperatura y concentración de soluciones de sacarosa para obtener el valor de la viscosidad, otras propiedades físicas que se pueden mencionar son: Calor específico, calor de cristalización, tensión superficial, presión de vapor, presión osmótica, actividad de agua y humedad relativa de equilibrio, depresión del punto de congelación y elevación del punto de evaporación de la solución [7,20].

Propiedades Químicas

La reactividad de los azúcares es moderada, tanto la glucosa como la fructosa tienen capacidad de actuar como agentes químicos reductores [20]. A la reacción entre los monosacáridos de la sacarosa con los aminoácidos y proteínas de un alimento, se le conoce como reacciones de Maillard las cuales producen compuestos de color café, conocidos como meladioninas, además de complejos volátiles con fuerte olor e intenso sabor; ésta es una de las reacciones comunes en la producción de alimentos [7,20]. Otras reacciones químicas en las que la sacarosa es involucrada son: Reacción de inversión, descomposición térmica, degradación ácida, y degradación alcalina [20].

Propiedades Biológicas

El azúcar es un importante metabolito en muchas reacciones biológicas incluyendo al metabolismo humano, debido a la reconversión de energía almacenada a partir de la oxidación de la glucosa [7,20], las reacciones de fermentación por levaduras para la producción de bióxido de carbono y alcohol son importantes en muchas áreas de la industria alimenticia, así como en la producción comercial de polisacáridos como los dextranos, y en general para la producción de ácidos orgánicos y cetonas, donde la sacarosa se emplea como sustrato [20].

1.1.4. Azúcar Granulado Características Físicas y Químicas

El azúcar se comercializa en varias categorías, (1) Refinada, (2) Estándar, (3) Mascabado y (4) Productos especiales (Azúcar Glass, Cubos, Tabletas, etc.). En este trabajo se concretará a la revisión de las características más importantes del azúcar refinada y estándar. El azúcar refinada es en esencia sacarosa pura, contiene un mínimo de 99.8% de sacarosa [1,4,20]. Se fabrica con una gran variedad de tamaños de cristal y contiene menos color que el azúcar estándar.

El color es un parámetro importante en el comercio, en él se basa muchas veces su precio, debido a que es relacionado con la pureza del producto, aunque esto no es estrictamente cierto, ya

que existen otras características establecidas por la National Food Processors Association (NFPA), National Soft Drink Association (NSDA), y la Pharmaceutical Industry (US Pharmacopeia, National Formulary) [4,12,20].

En la tabla 3, se exponen los parámetros de calidad que deben cumplir cada uno de los azúcares.¹

Tabla 3 Parámetros de calidad para azúcar refinado y estándar.

Parámetros	Refinada N.S.D.A. ^a	Refinada Coca Cola ^b	Azúcar Estándar ^c
Color ^d	35-60 UBR	25 UBR	100-150 UBR
Pureza	99.8 °Pol	99.8 °Pol	99.6 °Pol
Cenizas	máx.0.015 %	máx.0.015 %	0.03-0.1 %
Turbiedad	Negativo	Negativo	Positivo (20)
Sedimentos	máx. 2 ppm	máx. 2 ppm	5-10 ppm
Humedad	0.02 %	0.02 %	0.3%
Sabor,Olor	Negativos	Negativos	Positivos
Otros Orgánicos	0.01 %	0.01 %	0.02-0.5 %
Cuenta Microbiana	Máximo	Máximo	Máximo
Mesófilos	200c/10g	200c/10g	200c/10g
Hongos y Levaduras	c/u 10c/10g	c/u 10c/10g	c/u 10c/10g

* @ una Solución al 50 % de sólidos y una longitud de celda de 10 cm.

UBR= Unidades Básicas de Referencia.

°Pol= Cantidad de sacarosa determinada por Polarimetría.

Fuentes: ^a N.S.D.A., P.N.F. ^b Coca-Cola U.S.A., ^c O.N.U. Codex-Alimentarius.

Las diferencias más importantes que se aprecian son: El color de los azúcares, producto de los procesos de refinación y origen (caña o remolacha), alto contenido de cenizas para el azúcar estándar, la presencia de ácidos y polímeros orgánicos ocluidos en el grano, los cuales producen turbiedad en la solución, y la presencia de una cantidad muy fina de melazas que cubre los cristales de azúcar estándar.

¹ Adaptado de: Baikov, *Manufacture and Refining of Raw Cane Sugar*, Baker, Sugar y Chen., *Manual del Azúcar de Caña*.

I.2. Refinación de Azúcar

I.2.1. Generalidades

El proceso de refinación de azúcar involucra una serie de operaciones, con el objetivo de eliminar impurezas sólidas y compuestos de alto peso molecular, disminuyendo el contenido de color del azúcar. El procedimiento de obtención de azúcar a partir de la caña, se divide en tres fases [1,4,12,20]: Extracción del jugo, tratamiento del mismo y cristalización, los cuales se describen a continuación, ver figura 3.

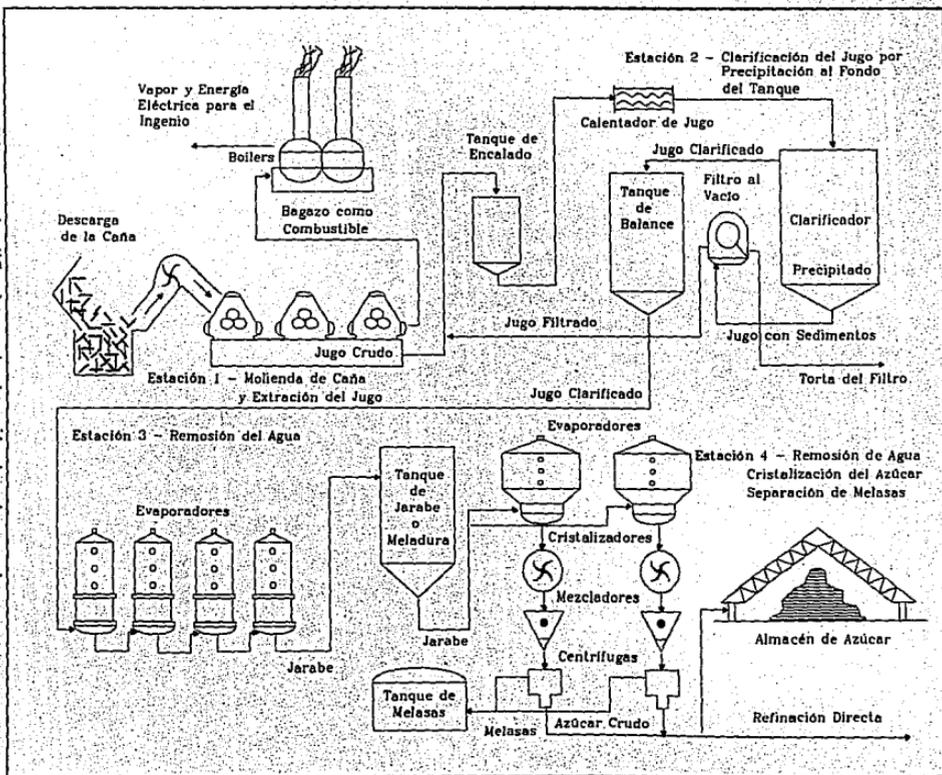
I.2.2. Obtenición del Azúcar Crudo

Una vez cortada la caña, es llevada a los molinos. La molienda tiene por objeto conseguir la mayor separación posible entre la fibra y el jugo de caña, la operación comprende dos fases: La primera implica la preparación de la caña, la cual se efectúa por medio de cuchillas corta caña, desfibradoras y/o desmenuzadoras, la segunda, es la trituración por medio de molinos, donde a presión se extrae el jugo de la caña, para eficientar la operación, el bagazo se hace pasar por agua (*imbición*) con lo que se aumenta el rendimiento de azúcar con la extracción por lixiviación [4,12,20].

El jugo de los molinos (*guarapo*), se envía y se somete a la *defecación* con lechada de cal, con el objeto de precipitar y neutralizar los ácidos libres, para después hacer precipitar la cal en forma de sales de calcio, las cuales arrastran consigo muchas de las impurezas presentes en el jugo. Existen tres maneras de lograr esta precipitación; por carbonatación, fosfatación, sulfitación, en México el proceso más común es por Fosfatación [2]. Una vez depurado, el jugo se envía a los clarificadores donde se separa el licor por decantación, estos equipos de clarificación se fabrican en muchos tipos y capacidades [1,2,4,12]. El jugo con sedimentos se filtra eliminando la torta e integrando el filtrado a la línea de clarificación. Posteriormente el jugo clarificado es conducido a los evaporadores, donde se le concentra hasta 65 °Bx [4,20].

Figura 3

Diagrama simplificado para la obtención de azúcar crudo.



El jarabe resultante es nuevamente enviado a evaporadores al vacío (*Tachos*), donde se consigue la saturación de la masa. Pequeños granos de azúcar (*Semillas*) son adicionados como núcleos para la formación de cristales de azúcar, los cuales aumentan de tamaño con la adición de jarabe, proceso conocido como cristalización. Cuando se alcanza el nivel deseado de sacarosa, la mezcla de jarabe y cristales de azúcar (*Masa cocida*), es descargada en los cristalizadores, donde lentamente es agitada y enfriada. Después de un tiempo esta mezcla, que en su mayoría son cristales, se manda a los mezcladores, continuando el proceso de enfriamiento. Finalmente la mezcla se conduce a las centrifugas donde se separa un jarabe incristalizable (*Melazas*) del azúcar crudo [4,20].

Las melazas finales contienen sacarosa, azúcares reductores, polímeros residuales, ceniza y agua. Las melazas se pueden emplear en la alimentación del ganado, producción de alcohol, levadura y otros [1,2,4,12]. El azúcar crudo contiene de 96 a 98 por ciento de sacarosa, pequeñas cantidades de agua azúcar invertido, y minerales [4,12].

1.2.3. Obtención del Azúcar Refinado a partir de Azúcar Crudo

En la figura 4 se muestra el diagrama de bloques simplificado del proceso de refinación a partir de azúcar crudo [4,12]. Este proceso es común en los ingenios debido a que durante la época de zafra, el azúcar crudo se obtiene como producto intermedio, el cual se almacena para su posterior refinación [1,4,12,20].

El primer paso del proceso es la afinación o lavado, que consiste en la separación de la pequeña capa de melazas que cubre la superficie del cristal de azúcar crudo [4,12]. La separación implica mezclar el crudo con un jarabe concentrado (alrededor de 75°Bx), para después purgar la mezcla en las centrifugas y lavarla con agua caliente. El siguiente paso es el fundido, mezclando el azúcar lavado con agua y obtener un jarabe concentrado. Posteriormente el jarabe es sometido a las operaciones de clarificación, filtración, y decoloración de las cuales se hablará en forma detallada más adelante.

Por último, el jarabe clarificado y decolorado conocido como *licor* se concentra por evaporación en etapas diferentes. A partir de aquí el proceso es similar a la obtención del azúcar crudo, salvo las operaciones de empaclado y distribución [1,4,12,20].

Proceso de Elaboración de Azúcar Refinado

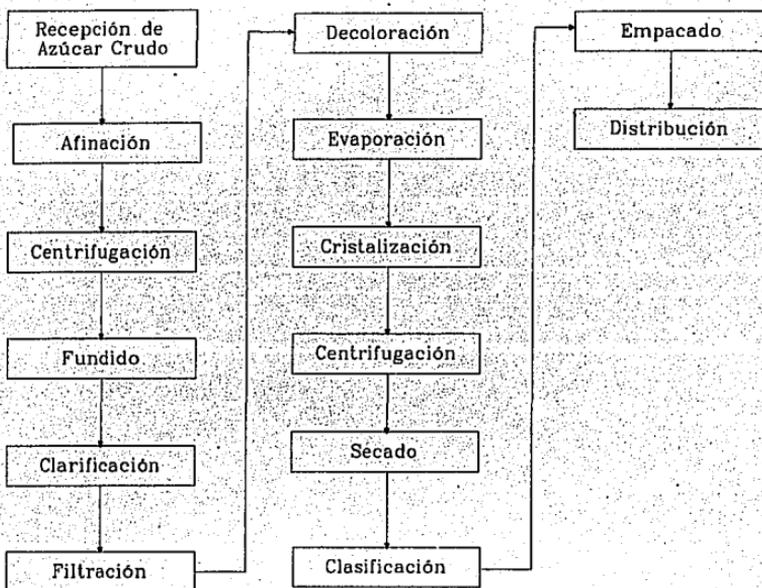


Figura 4 Diagrama de bloques del proceso de refinación del azúcar.

Durante las últimas fechas los compradores de azúcar han exigido un producto que cumpla con normas de calidad más estrictas; bajo contenido de colorantes, cenizas, metales, humedad, además de un riguroso control microbiano, etc. Debido a esto investigadores han desarrollado trabajos en la optimización de las operaciones de clarificación y decoloración [4,12].

1.2.4. Clarificación

La clarificación del azúcar se define como: *El tratamiento de las soluciones con ciertas sustancias y calor para lograr la precipitación de las impurezas solubles y coloidales*. Los materiales que originan el color en el azúcar se pueden clasificar en tres categorías [4,12]:

- 1).- Pigmentos vegetales provenientes de la planta de origen.
- 2).- Materiales del tipo de meladioninas que resultan de la reacción de aminoácidos con azúcares reductores.
- 3).- Materiales tipo caramelo resultantes de la descomposición térmica de la sacarosa.

Las moléculas de colorantes se encuentran en una extensa gama de pesos moleculares (p.e. de 500 a 50,000). Hacia el más alto de éstos se hallan fragmentos de carbohidratos repolimerizados altamente hidratados solubles en agua [4]. Casi todos los colorantes del azúcar son aniónicos, y los grupos ácidos están situados a lo largo de la molécula del colorante [4,12]. Los tratamientos de clarificación implican la formación de un precipitado inorgánico, donde los colorantes son absorbidos por los cristales de la sal (p.ej. sulfato, fosfato o carbonato de calcio), el cual es separado por uno de los siguientes procedimientos: Decantación, flotación o filtración [1,2,4,12].

Fosfatación

El licor crudo se trata con ácido fosfórico y cal en condiciones controladas de tiempo (depende de la concentración de cal) y temperatura (75-85 °C), lo que genera una reducción del color debido a la formación de la sal de calcio. La separación de esta sal se lleva a cabo por filtración a presión empleando coadyuvantes de la filtración [4,12]. Otra práctica común, es la separación de las impurezas por flotación, lo cual consiste en inyectar al licor, pequeñas burbujas de aire que arrastran las impurezas formadas (*sobrenadante*) hacia la superficie del líquido. Existen en la industria de refinación de azúcar una gran variedad de equipo tanto de filtración como de flotación conocidos estos últimos como clarificadores de espuma [1,2,4,12].

Sulfitación

El licor de azúcar crudo tratado con cal es sulfitado con anhídrido sulfuroso, después de un tiempo de maduración (10-15'), los flocos de la sal, son separados por decantación, flotación y/o filtración. Este procedimiento es muy común en la obtención de azúcar blanco, ya que se utiliza como auxiliar después de la clarificación por fosfatos [12].

Carbonatación.

Este mecanismo de remoción del color se basa en la teoría de precipitación seguida por la absorción (oclusión), también es posible la adsorción de colorantes de alto peso molecular [1,4]. El procedimiento consiste en hacer precipitar carbonato de calcio CaCO_3 , del jarabe mediante la adición de cal y el burbujeo de dióxido de carbono gaseoso en condiciones controladas de temperatura y alcalinidad. La reacción forma un precipitado cristalino y voluminoso que absorbe materia insoluble y semicoloidal, así como también una proporción de cenizas y material colorante [4,12]. El precipitado se separa por medio de filtración debido a que la cantidad de precipitado a separar es mayor que en los otros métodos de clarificación [4].

Fosfatación con Sales de Amonio Cuaternario

Básicamente es una modificación de la fosfatación utilizando sales de amonio cuaternario como catalizador en la formación de las sales de calcio. La remoción del color se realiza en su mayor parte por precipitación seguida de absorción/adsorción. El uso de las sales de amonio cuaternario es más efectivo cuando están presentes colorantes altamente ácidos [4].

Proceso Talofloc de Decoloración y Clarificación Simultánea [3,4].

Este proceso aprovecha las propiedades aniónicas de muchos de los colorantes presentes en el azúcar y que se utilizan en el intercambio de iones, ya que el color y otras impurezas aniónicas

de elevado peso molecular pueden ser precipitadas por la adición de ciertos tipos de agentes tensoactivos o surfactantes catiónicos. Para remover el precipitado se aplica un procedimiento modificado de flotación. Este proceso es relativamente nuevo, el costo de los insumos es considerablemente alto, además de que no se producen en México.²

En México, los procesos de clarificación más empleados por los ingenios, son la *Fosfatación* y la *Sulfitación*, procesos que se han mantenido vigente durante varios años, esto se debe a que el costo de operación en ambos es relativamente bajo, además de que los insumos del proceso tienen una alta disponibilidad, aunque este último ha ido quedando como proceso auxiliar en la obtención de azúcar blanco [12]. La clarificación por *Carbonatación* es una operación poco común en la industria mexicana debido a que el proceso es relativamente nuevo y se necesitaría una gran inversión de capital en equipo e instalaciones para lograr este cambio y la mayoría de los ingenios no han estado en condiciones de invertir o hacer cambios estructurales. Sin embargo esta operación presenta varias ventajas entre las cuales se encuentran el menor costo de operación, un azúcar con menor impurezas y mejor color, etc [4,12].

1.2.5. Decoloración

A la separación de los colorantes presentes en el azúcar se le conoce como *decoloración*, esta remoción resulta de uno o la combinación de los siguientes mecanismos; adsorción, intercambio de iones, oclusión (fosfatación o carbonatación, descritos en la sección de clarificación). A continuación se describen los mecanismos [4]:

- 1) *Adsorción*: Mediante enlaces hidrofóbicos, p.ej. en la eliminación de un colorante aromático por carbón la cual se describirá más adelante.

² Comunicación Personal, Gerencia Industrial de Financiera Nacional Azucarera S.A. de C.V., (FINASA).

- 2) **Intercambio de iones:** Por medio de un grupo funcional, los colorantes iónicos son removidos por resinas de intercambio iónico. Los intercambiadores de iones son fabricados con diversos materiales insolubles, polímeros orgánicos sintéticos (resinas) con un gran número de sitios iónicos o de intercambio unidos. Los intercambiadores debido a la pérdida de la capacidad fallan, ya que los sitios de intercambio se obstruyen por materiales que no son removidos en la regeneración por salmuera [1,4].
- 3) **Precipitación seguida de la oclusión y/o adsorción** por fuerzas de Van der Waals [4].
- A). Precipitación : se forman complejos con sustancias orgánicas como sales de amonio cuaternario/cationes inorgánicas como Ca^{2+} .
- B). Absorción: atrapado dentro del cristal/adsorbente poroso.

1.2.6. Decoloración con Adsorbentes de Carbón

Los adsorbentes de carbón son materiales porosos, la mayor parte del área superficial se halla en los poros dentro de las partículas, el material que se adsorbe debe pasar a los poros a fin de alcanzar el sitio de adsorción. Estos adsorbentes de carbón adsorben con mucha fuerza. A continuación se presenta una lista de los adsorbentes de carbono que se utilizan en los procesos de refinación y los materiales sobre los cuales resultan efectivos:

1. **Carbón animal y su sustituto sintético** → colorantes y ceniza. Este tipo de carbón es efectivo, sin embargo se necesita de gran espacio para contener el licor, debido a que la remoción se lleva a cabo estando el licor en contacto con el carbón de 24 a 48 hr. La regeneración del carbón se hace por calcinación [1,4,12].
2. **Carbón granulado** → colorantes. Este tipo de carbón ha venido sustituyendo al anterior, debido a que posee mayor capacidad de decoloración, lo cual representa ahorro en espacio, sin embargo tiene menor capacidad de remover cenizas. Su regeneración se hace por calcinación [4,12].

3. **Carbón pulverizado** → coloides y colorantes [4,12,21].

Adsorción con Carbón Activado Pulverizado

La velocidad de decoloración aumenta directamente con la reducción del tamaño de la partícula del adsorbente, lo que facilita el contacto entre los colorantes con las áreas de adsorción [1,4]. El proceso es sencillo, la solución de azúcar (60 a 64 °Bx) se ajusta a un pH de 7.0 y se calienta a $\approx 82\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante 15 a 20 min antes de la filtración [4,21]. La ventajas radican en :

- 1) Breve tiempo de contacto debido al tamaño de partícula del carbón.
- 2) Para las operaciones estacionales en pequeña escala constituyen una inversión económica reducida en equipo y materiales adsorbentes.

En el cuadro 4 se presenta las especificaciones de la compañía Polifos S.A. de C. V. para el carbón activado pulverizado empleado en la refinación de azúcar [21].

Cuadro 4 Especificaciones para el carbón activado pulverizado.

	Actibón 'S-61'
Apariencia	polvo negro
pH	6.0-8.5
Actividad, Azul de Metileno	22% mínimo
Actividad, Melazas	92% mínimo
Actividad, Yodo	75%
Humedad al empacarse	12% máximo
Tamaño de partícula	90% min. pasa malla 200
Cenizas	22% mínimo
Densidad aparente	0.35 g/c.c. máximo

Usos: Principalmente en el tratamiento de aguas municipales; en la refinación de azúcar a partir de caña y a partir de betabel; en la purificación de aceites y grasas comestibles, en el tratamiento de bebidas alcohólicas y en el tratamiento de hules de desperdicio.

Fuente: Polifos S.A.de C.V. Carbón Activado **Actibón®**.

1.2.7. Coadyuvantes de la Filtración

En la actualidad se utilizan dos métodos de clarificación [4], la primera emplea sustancias químicas que forman precipitados en el licor; La segunda emplea coadyuvantes de la filtración inertes que permiten la filtración a presión. La operación, empleando estos materiales permite el aumento de la velocidad de filtración, debido a que en su desarrollo [4,12,15] primero se recircula una suspensión de filtro ayuda, con lo que se forma una delgada capa protectora de filtro ayuda (precapa) sobre el medio filtrante. Una vez formada la precapa, se agregan regularmente pequeñas cantidades de filtro ayuda (dosificación). A medida que la filtración progresa, el filtro ayuda, mezclado con el líquido turbio, se deposita en la precapa, formando continuamente una nueva superficie de filtración. Las diminutas partículas de filtro ayuda proporcionan innumerables canales microscópicos que retienen las impurezas suspendidas y permiten que el líquido pase libremente sin ser obstruido [8,15,19].

Estos materiales deben cumplir con ciertas características, algunas de las cuales se desglosan a continuación [15,19]:

- 1). Ser químicamente inertes e insolubles en el líquido a ser filtrado.
- 2). Estar formados por partículas individuales, porosas, formas intrincadas, además de presentar rigidez.
- 3). Formar una torta de filtración incomprensible, rígida, y permeable.
- 4). Remover sólidos, aún los más finos a altas velocidades de flujo.

Existen varios materiales que cumplen con las características anteriores, los cuales son seleccionados de acuerdo a las cualidades del líquido a filtrar [15].

1.3. Metodología de Escalamiento

La filtración es una operación donde se consigue la separación mecánica de sólidos contenidos en un fluido, por lo que se halla sujeto a un régimen dinámico [14], sin embargo, en la práctica, la teoría de modelos no se aplica al escalamiento de experimentos de filtración, debido a que la magnitud absoluta de las partículas sólidas y del fluido, así como sus formas geométricas, están determinadas por las condiciones del proceso, por lo cual en una experimentación de éste tipo, la suspensión a filtrar deberá poseer las mismas propiedades de filtración que a una escala mayor [8,14,16].

El único método directo para escalamiento de resultados experimentales, es a partir de un filtro a pequeña escala, que corresponda en semejanza mecánica al modelo a gran escala [14]. Sin embargo, no debería existir dificultad teórica, en el escalamiento de pruebas de filtración, en dimensiones directas de área, extrapolación a presiones mayores, o incrementos en el espesor de la torta por medio de alguna de las ecuaciones empíricas de velocidad que existen, pero por experiencia, las velocidades industriales de filtración son menores, a aquellas que se pronosticaron con base a experimentos a pequeña escala, por lo cual es aconsejable el permitir un margen de seguridad en la especificación del área de filtración, algunos autores recomiendan manejar un margen de seguridad del 30 al 50% [14,16].

Una de las causas de estas diferencias, se debe a la variedad en el tamaño restringido de los diámetros hidráulicos por los que pasa el filtrado [8,18].

1.3.1. Fundamentos de Filtración

La filtración se puede definir como la operación de remoción de componentes insolubles de una suspensión en la que, los sólidos son retenidos formando un lecho de partículas de estructura porosa que aumenta de espesor con el paso del filtrado, que fluye a través de tres tipos de resistencias en serie [8,18]; (1) resistencia al paso a través de los poros de la torta, (2) resistencia

asociada con el medio filtrante, y (3) resistencia de tuberías y accesorios. Para el análisis de la operación a presión constante se parte de la ecuación general de filtración [8,18].

$$\frac{dV}{A dt} = \frac{-\Delta P}{\mu \left(\frac{\alpha C_s V}{A} + R_m \right)} \quad (1)$$

Donde: μ =Viscosidad del filtrado (Pa·s)

C_s =Concentración de sólidos de la suspensión (kg/m³)

V =Volumen de filtración (m³)

t =Tiempo (s)

α =Resistencia específica de la torta (m/kg)

R_m =Resistencia del medio filtrante (m⁻¹)

A =Área de filtración (m²)

ΔP =Caída de presión del sistema (Pa)

Para el análisis a presión constante los términos se agrupan en:

$$\frac{dt}{dV} = \frac{\mu \alpha C_s}{A^2 (-\Delta P)} V + \frac{\mu}{A (-\Delta P)} R_m = K_p V + B \quad (2)$$

$$K_p = \frac{\mu \alpha C_s}{A^2 (-\Delta P)} \quad (3)$$

$$B = \frac{\mu R_m}{A (-\Delta P)} \quad (4)$$

Donde K_p está en s/m⁶ y B en s/m³ (Sistema Internacional).

Para presión y α constantes, además de una torta incompresible, V y t son las únicas variables. Integrando para el tiempo t de filtración.

$$\int_0^t dt = \int_0^V (K_p V + B) dV \quad \Rightarrow \quad t = \frac{K_p}{2} V^2 + BV \quad (5)$$

$$t = \frac{\mu}{(-\Delta P)^s} \left\{ \frac{\alpha C_0}{2} \left(\frac{V}{A} \right)^2 + R_m \frac{V}{A} \right\} \quad (6)$$

Para el caso de tortas compresibles donde α aumenta con la presión $(-\Delta P)$, ya que la mayoría de las tortas presentan cierta compresibilidad [8,14,18], por lo tanto una ecuación de uso común es:

$$\alpha = \alpha_0 (-\Delta P)^x \quad (7)$$

Donde α_0 y x son constantes empíricas. La constante de compresibilidad x es cero para lodos incompresibles y de 0.1 a 0.8 para comprimibles [8,18].

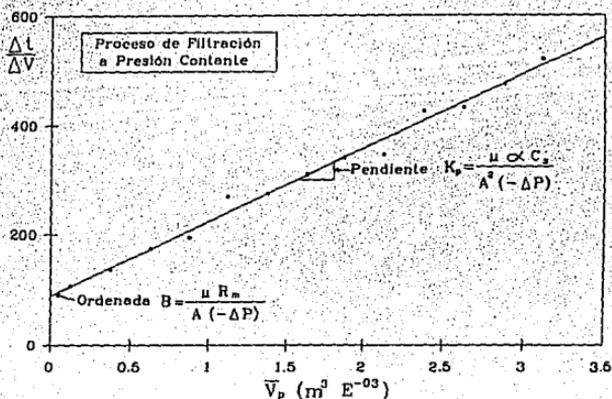
Para evaluar el proceso es imprescindible conocer α y R_m mediante experimentación y uso de la ec (2). El procedimiento experimental de caracterización para filtración a presión constante consiste en [8,18]: Fijar los valores de volumen filtrado a recolectar; obtener los tiempos para cada uno hasta un volumen final establecido, la información se procesa bajo la siguiente secuencia de cálculo; V_i y V_j para dos tiempos sucesivos t_i y t_j , $\Delta V = V_j - V_i$ y $\Delta t = t_j - t_i$, calcular $\Delta t / \Delta V$ y graficar estos puntos en función de \bar{V} promedio durante el intervalo de $\bar{V} = (V_i + V_j) / 2$, y trazar la línea que responda a los puntos.

t	V	Δt	ΔV	$\Delta t / \Delta V$	$\bar{V} = (V_i + V_j) / 2$
-----	-----	------------	------------	-----------------------	-----------------------------

La pendiente de la línea es K_p y la intersección a la ordenada es B con lo cual se obtienen α y R_m para la condición de la corrida, lo anterior se observa en la gráfica 3.

En resumen el procedimiento de escalamiento de las condiciones de operación se lleva a cabo bajo la siguiente secuencia de cálculo:

- 1).- Establecer la capacidad del sistema, en base a la velocidad máxima de filtración en m^3/hr .



Gráfica 3 Determinación gráfica de las constantes de filtración para un proceso a presión constante.

- 2).- Establecer un tiempo como base de cálculo, p.e. una hora.
- 3).- Conocer las propiedades de la suspensión es decir, el valor de las variables de la ec (6), para la operación a escala industrial como son; viscosidad (μ), concentración de sólidos (C_s), considerando que el valor de los parámetros de filtración (α y R_m) se mantendrán constantes [8,14,18].
- 4).- Presión de operación; esta variable es una de las más importantes en la operación, ya que es posible extrapolar el valor a presiones mayores y obtener el área de filtración, es recomendable hacer el cálculo con un valor reducido y garantizar una mayor área de filtración [8,14].
- 5).- Área de filtración; es la variable a determinar en el escalamiento, por lo que es necesario establecer un margen de seguridad [14].

CAPITULO II

Desarrollo Experimental y Resultados

II. Desarrollo Experimental

El desarrollo experimental de este trabajo se estructuró en tres fases como se muestra en la figura 5 y figura 6.

La primera etapa involucra tres experimentos con el objetivo principal de establecer las mejores condiciones de decoloración para los jarabes de azúcar, estableciendo metas a partir del primer experimento que funcionó como diagnóstico.

La segunda fase involucra dos experimentos en base al trabajo de clarificación utilizando filtración a presión. En esta etapa de manera preliminar se trata de establecer las condiciones de filtración a nivel piloto.

Como última fase experimental se trabaja a nivel piloto abordando de nueva cuenta y de una manera más profunda el desarrollo de la clarificación a través de la filtración a presión, con lo cual se trabaja en 5 experimentos de manera seriada.

II.1. Primera Fase Experimental

Para iniciar esta etapa experimental primeramente se estableció el tipo de decolorante a ser usado. Como resultado de la investigación de decolorantes se determinó el empleo de carbón activado considerando las ventajas descritas que se presentan en el cuadro 4 (pág 21). Por otro lado el filtro ayuda hy flo-supercel fue seleccionado en base a sus características físicas, que permiten una buena velocidad de filtración y con un tamaño de poro relativamente reducido como se especifica en el folleto de consulta del proveedor de celite filtro ayuda [15].

Durante esta primera etapa se establecieron las bases del trabajo de decoloración bajo el desarrollo de los experimentos que a continuación se detallan.

METODOLOGIA EXPERIMENTAL

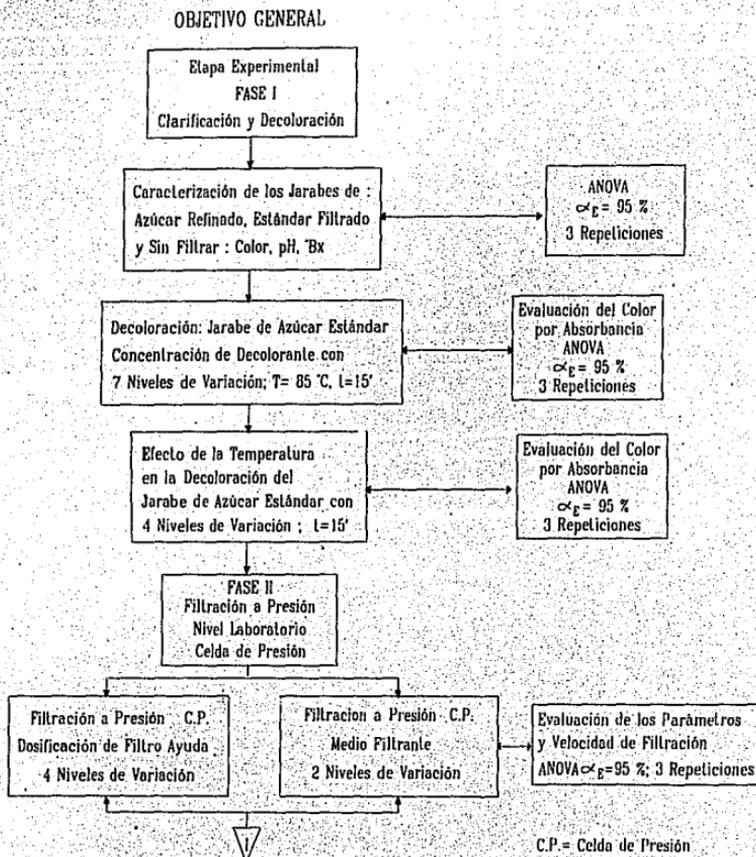


Figura 5 Metodología general de la experimentación.

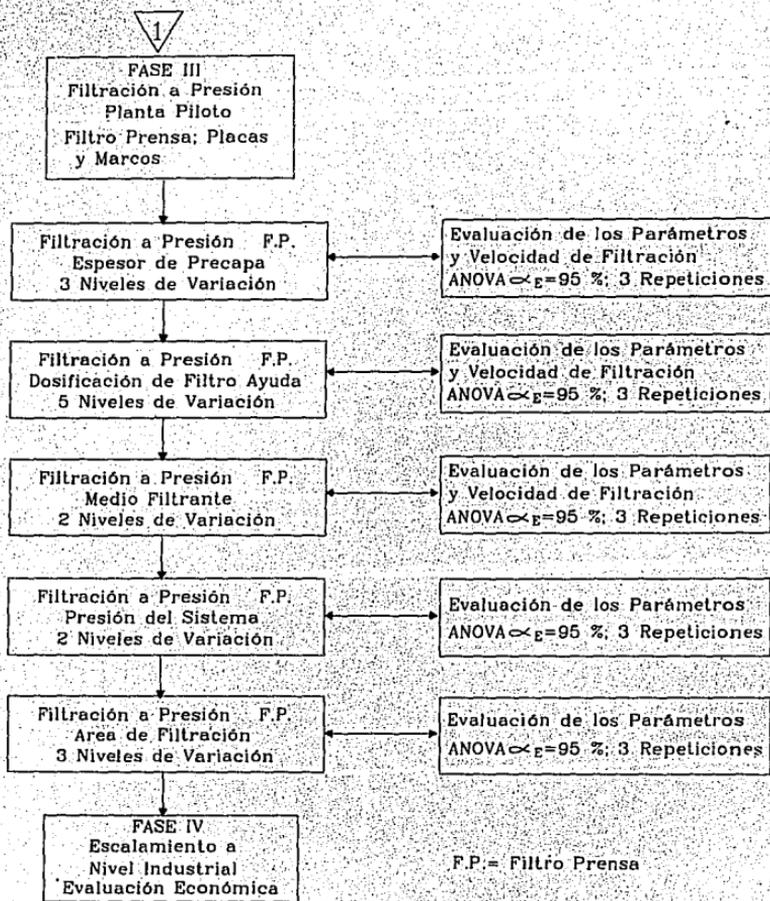


Figura 6 Metodología general de la experimentación (continuación).

II.1.1. Experimento 1: Caracterización de los jarabes elaborados con azúcar refinada y azúcar estándar.

Objetivos:

Establecer las características óptimas deseadas del producto final a partir de una solución de azúcar refinada como patrón de referencia.

Determinación y evaluación de las características físicas, químicas y fisicoquímicas de interés para las soluciones concentradas de azúcar a 60 °Bx.

Variables: Color por Absorbancia, absorbancia del licor, temperatura, °Bx, pH, tipo de azúcar.

V. Independiente: Tipo de azúcar.

V. Dependiente: Color por absorbancia.

V. Respuesta: Absorbancia del licor a 420 nm (λ_{420nm}).

V. Controladas: °Bx, °T, pH.

Hipótesis: El azúcar refinada debido a los métodos de refinación, presenta una composición de colorantes residuales distinta al del azúcar estándar, los cuales se manifiestan tanto en el color del grano como en solución, por lo tanto se encontrará diferencia considerable entre los colores de ambos que permita sustentar esta experimentación.

Hipótesis Estadística: $H_0: \mu_R = \mu_E$

$H_1: \mu_R \neq \mu_E$

Materiales y Métodos:

Se elaboraron muestras de 200 ml de jarabe de azúcar a 60 °Bx empleando azúcar refinada y azúcar estándar, en la elaboración de los jarabes se aplicó el concepto de °Bx, el cual se usa como

indicador de las proporciones relativas de los dos componentes, agua y azúcar: "°Bx es la relación del porcentaje en peso de azúcar y agua en solución"; por lo que se disolvieron 154.4 gr de azúcar en 104 ml de agua a 60°C manteniéndose en agitación por 10 minutos, para después ser calentado hasta 80-85°C. Cabe señalar que los jarabes de azúcar empleados en todas las fases experimentales, fueron ajustados a 60 °Bx y determinados por el método descrito en el Apéndice I.

El jarabe fue filtrado al vacío empleando *hy flo-supercel* como coadyuvante de la filtración, el sistema de filtración se muestra en la figura 7.

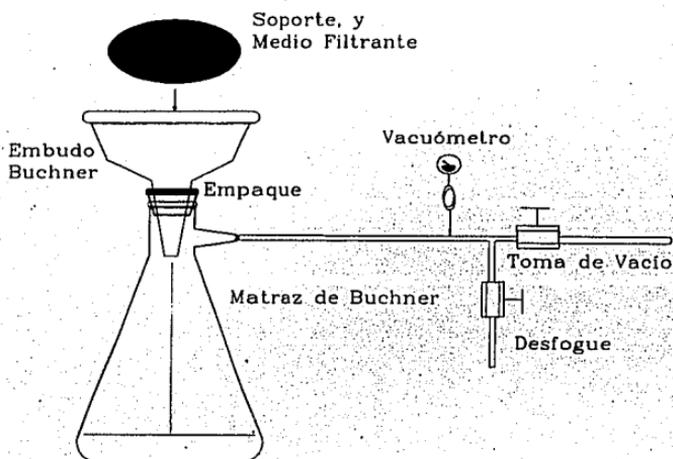


Figura 7 Sistema de filtración al vacío; nivel laboratorio.

El procedimiento de filtración consistió en: Montar el sistema de filtración al vacío, fijando el medio filtrante de nylon al embudo buchner y al matraz; con un empaque se evitó cualquier fuga.

Posteriormente la manguera se conectó a la toma de vacío, abriendo la válvula de la toma para iniciar el montaje de la precapa; la intensidad del vacío se ajustó con la válvula de desfogue.

Para montar la precapa en el medio filtrante, se hicieron fluir 100 ml de una suspensión de filtro ayuda al 6%, a través del medio a una intensidad de vacío constante, de esta forma las partículas de filtro ayuda se fueron depositando, formando un espesor de precapa de aproximadamente 3 mm. El jarabe se hizo fluir a través de la precapa, el filtrado obtenido fue separado en recipientes identificados para las posteriores determinaciones.

Como niveles de variación se eligieron dos jarabes de azúcar estándar con diferencias en la elaboración, el primero fue filtrado, el segundo se empleó sin filtrar, además del azúcar refinada. Se realizaron tres repeticiones para cada nivel de variación, el análisis estadístico fue por el Diseño Completamente al Azar (ANOVA).

Para la determinación de absorbancia que se utilizó como medida del color, se empleó un Espectrofotómetro Beckman modelo DV-64 a una longitud de onda de 420 nm (*longitud de máxima absorbancia*, λ_{420nm}), que más tarde se transformaron en unidades de color de la *International Commission for Uniform Methods of Sugar Analysis*, ICUMSA; para la determinación de pH y °Bx, se emplearon técnicas oficiales, se resumen en el cuadro 5 y se describen en el Apéndice I (pág 105).

Cuadro 5 Determinaciones para la caracterización de los jarabes.

Característica	Método	Página
Color	ICUMSA	105
pH	USNC MOA 0011	106
°Bx	ICUMSA	107

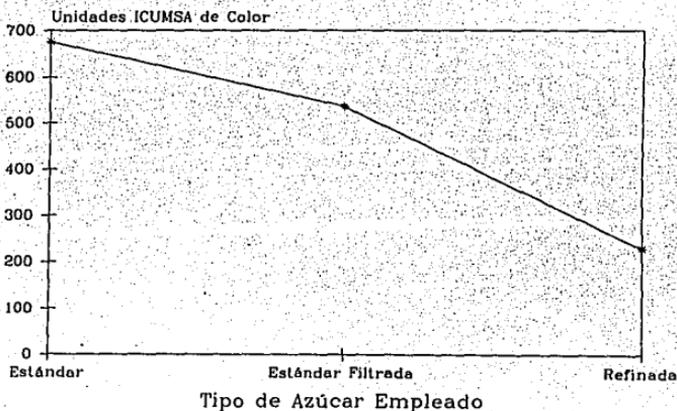
Resultados:

Los resultados de la determinación de absorbancia se muestran en la tabla 4. En la gráfica 4 se puede apreciar que como era de esperarse y debido a la composición de colorantes presentes en los tres tipos de jarabes evaluados, existe una marcada diferencia de color entre estos.

Por lo que respecta al jarabe de sin filtrar, se aprecia además, que el contenido de sólidos suspendidos contribuye al aumento de la absorbancia y por lo tanto del color.

Tabla 4 Índices de color ICUMSA para jarabes elaborados con azúcar refinada y azúcar estándar filtrado y sin filtrar.

Azúcar Refinada	Estándar Filtrada	Estándar Sin/Filtrar
246	536	665
213	535	687
229	540	676



Gráfica 4 Índices de color para los diferentes tipos de azúcar.

Análisis de Resultados:

Los índices de color para los jarabes fueron analizados estadísticamente con el Diseño Completamente al Azar (ANOVA) Apéndice II Métodos Estadísticos (pág 108), el cual se presenta en el cuadro 6.

Cuadro 6 ANOVA para los índices de color de los diferentes jarabes.

Fuente de Variación	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrados Medios	F_c
Tratamientos	2	313491	156745	1174
Error	6	800	133	
Total	8	314291		

$F_1=5.14$ para una significancia $\alpha_r=5\%$, 2 y 6 grados de libertad, para el experimento $F_c=1174$, entonces como $F \gg F_1$, la hipótesis nula H_0 se rechaza y se acepta la hipótesis alterna H_1 , concluyendo que existe diferencia estadística entre el índice de color de los jarabes de azúcar.

Se realizó la prueba de Tuckey para encontrar cuales eran las medias que marcaban tal diferencia (pág 108), el DMSH=28.94 al mismo nivel de significancia, donde todas las comparaciones entre las medias presentaron una diferencia mayor al DMSH, por lo tanto se concluye que existen diferencia significativa en el color para los diferentes tipos de jarabes de azúcar.

Esto era presumible debido a que los procesos de obtención de azúcar refinada y azúcar estándar son diferentes, por lo tanto también el producto, además con la filtración del jarabe de azúcar estándar fue posible remover algunas partículas en suspensión, con lo cual se pudo atenuar el índice de color del jarabe filtrado.

II.1.2. Experimento 2: Determinación de la Concentración de Decolorante.

Objetivo: Determinar experimentalmente la concentración de carbón activado necesaria para la decoloración del jarabe de azúcar estándar, a la cual se obtenga una reducción significativa del color comparable con el jarabe de azúcar refinada como patrón de referencia.

Variabes: °Bx, °T, filtro ayuda, concentración de carbón activado, velocidad de agitación, color por absorbancia, tiempo de contacto.

V. Independiente: Concentración del carbón activado

V. Dependiente: Color por absorbancia

V. Respuesta: Absorbancia del Licor a 420 nm (λ_{420nm})

V. Controladas: °Bx, °T, Tiempo de contacto, filtro ayuda, agitación.

Hipótesis: La remoción de colorantes será directamente proporcional a la concentración de carbón activado utilizado en la operación, manteniendo tiempo y temperatura constantes, con lo que se espera obtener una concentración de carbón activado a la que el índice de color del licor filtrado sea semejante al licor patrón.

Hipótesis Estadística:

$$H_0: \mu_{C1} = \mu_{C2} = \mu_{C3} = \mu_{C4} = \mu_{C5} = \mu_{C6} = \mu_{C7} = \mu_{C8} = \mu_{C9}$$

$$H_1: \text{al menos una } \mu_{Ci} \neq \mu_{Cj}$$

Materiales y Métodos:

Se preparó el jarabe siguiendo el procedimiento descrito en el experimento 1.

Decoloración de la Solución :

El jarabe fue calentado a una temperatura de entre 80-85°C empleando para esto una parrilla Corning con agitación magnética como se ilustra en la figura 8; el carbón activado fue adicionado al jarabe en concentraciones establecidas en los niveles de variación del experimento (0.00, 0.20, 0.25, 0.30, 0.35, 0.40, 0.60, 0.90, y 1.20), los cuales se encuentran entre 0.2 y 3.0%, rango recomendado por el proveedor de carbón activado [21], y están expresadas en relaciones masa con respecto a los sólidos de azúcar.

La temperatura de la suspensión (jarabe de azúcar-carbón activado) fue mantenida en el rango especificado, con agitación constante por 15' para asegurar un contacto homogéneo entre las fases en suspensión.

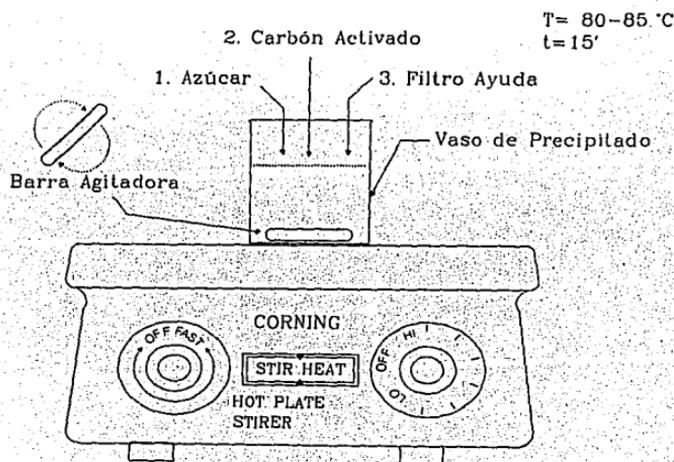


Figura 8 Parrilla con agitación magnética.

La remoción de los sólidos en suspensión se llevó a cabo por filtración al vacío, procedimiento descrito en el experimento 1, el sistema de filtración al vacío se muestra en la figura 7 (pág 32). Las determinaciones de índice de color, pH, y °Brix para el licor de azúcar se realizaron siguiendo los procedimientos descritos en el Apéndice I (pág 105).

Resultados:

Las lecturas de absorbancia se convirtieron a índices ICUMSA de color. Los resultados se presentan en la tabla 5. En la gráfica 5 se puede apreciar la diferencia en el color de los jarabes tratados con varias concentraciones de carbón activado.

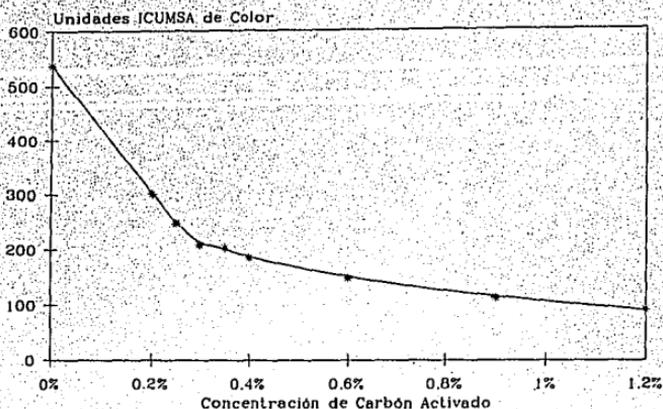
Tabla 5 Índices de color para diferentes concentraciones de carbón activado.

C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈	C ₉
[0.00]	[0.20]	[0.25]	[0.30]	[0.35]	[0.40]	[0.60]	[0.90]	[1.20]
536	305	249	203	210	188	159	105	89
535	297	247	215	207	180	148	113	81
540	301	254	210	192	187	139	122	103

Análisis de Resultados:

Los Índices de color para los licores fueron analizados estadísticamente siguiendo la metodología del Diseño Completamente al Azar Apéndice II (pág 108), el análisis se presenta en el cuadro 7.

$F_1=2.51$ para una significancia $\alpha_5=5\%$, 8 y 18 grados de libertad y para el experimento $F_c=998$, como $F_c \gg F_1$ se rechaza la hipótesis nula H_0 y se acepta la hipótesis alterna H_1 , concluyendo que existe diferencia estadística a este nivel entre el color de los licores de azúcar tratados con diferente concentración de carbón activado. Para la prueba de Tuckey a 5%, el $DMSH=20.8$, si la diferencia entre dos medias de los niveles de variación excede este valor serán consideradas estadísticamente significativas, Apéndice II (pág 108).



Gráfica 5 Curva de decoloración de jarabe de azúcar estándar para diferentes concentraciones de carbón activado.

Cuadro 7 ANOVA para los índices de color a diferentes concentraciones de carbón activado.

Fuente de Variación	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrados Medios	F _c
Tratamientos	8	426921	53365	998
Error	18	962	53.43	
Total	26	427883		

En la mayoría de las comparaciones existe diferencia estadística entre las medias a excepción de C₄-C₅, C₅-C₉, por lo que para las demás, si existe diferencia significativa en los índices de color para las diferentes concentraciones de carbón activado, esto era esperado debido a que la remoción de los colorantes del jarabe es proporcional al aumento de la concentración de decolorante como se aprecia en la gráfica 5, sin embargo la remoción no fue directamente proporcional como se pensaba.

La selección de la concentración de carbón activado, se llevó a cabo en base al índice de color del jarabe de azúcar refinada (229 unidades ICUMSA) como patrón de comparación. Las concentraciones de carbón activado a las que se obtienen índices de color más cercanos al color del jarabe de azúcar refinada están entre 0.25% y 0.3% (209 y 250 respectivamente). Ambos índices de color están muy cerca del color del azúcar refinada, por lo que se optó por seleccionar la concentración de 0.25% (C₁).

II.1.3. Experimento 3: Determinación de la Temperatura de Proceso.

Objetivo: Establecer la temperatura mínima del proceso de decoloración para un tiempo de contacto de 15 minutos entre el carbón activado y el jarabe de azúcar.

Variables: °Bx, °T, índice de color por absorbancia, tiempo de contacto, concentración de decolorante, tipo de filtro ayuda, velocidad de agitación.

V. Independiente: °T

V. Dependiente: Índice de color por absorbancia.

V. Respuesta: Absorbancia del licor a 420 nm (λ_{420nm}).

V. Controladas: °Bx, tiempo de contacto, tipo de filtro ayuda, concentración de decolorante, velocidad de agitación.

Hipótesis: La combinación tiempo-temperatura es una variable importante en la adsorción, ya que influye de manera directa en la velocidad con la que los colorantes son adsorbidos, disminuyendo la viscosidad del fluido, facilitando así el contacto íntimo entre la solución y los adsorbentes. Si el aumento de esta velocidad de adsorción se llevara mas allá de un punto crítico, lo cual resultaría contraproducente, debido a la posibilidad de que se presente una reversión en la capacidad de adsorción del carbón activado provocando que los colorantes una vez adsorbidos sean desprendidos.

Hipótesis Estadística:

$$H_0: \mu_{T1} = \mu_{T2} = \mu_{T3} = \mu_{T4}$$

$$H_1: \text{al menos una } \mu_{Ti} \neq \mu_{Tj}$$

Materiales y Métodos:

El jarabe de azúcar estándar se preparó y decoloró siguiendo el procedimiento que se indica en los experimentos 1 y 2. Se trabajó con una concentración de carbón activado de 0.3% con respecto a los sólidos de azúcar por un lapso de 15 minutos, variando la temperatura de proceso en un rango establecido.

Se trabajó con cuatro niveles de variación y tres repeticiones, seleccionados a partir las condiciones descritas por Baikov, Chen y el proveedor de carbón activado [1,4,21]. Los jarabes fueron calentados dentro de los siguientes rangos de temperatura 75-80, 80-85, 85-90 y 90-95°C; la cual fue controlada por medio de una parrilla Coming con agitación magnética, figura 8 (pág 37) manteniéndose en agitación constante para permitir el contacto entre las fases.

La remoción del carbón activado en la suspensión problema se llevó a cabo por filtración al vacío, figura 7. En la determinación de color se trabajó con un Espectrofotómetro Beckman modelo DV-64 a una longitud de onda de 420 nm (*Longitud de máxima absorbanca $\lambda_{420\text{ nm}}$*) con el cual se obtuvo las lecturas de absorbanca; pH, °Bx, y el índice de color, se determinaron empleando los métodos de análisis descritos en el Apéndice I (pág 105).

Resultados:

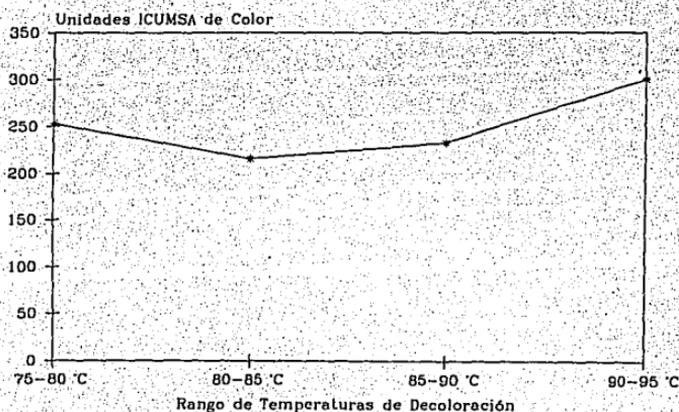
Las lecturas de absorbanca se convirtieron a índices de color siguiendo el método ICUMSA de medición de color; los resultados se presentan en la tabla 6. En la gráfica 6 se aprecia diferencia en el color de los licores tratados a diferentes temperaturas.

Análisis de Resultados:

Los Índices de color para los licores tratados a diferentes temperaturas fueron analizados estadísticamente con un diseño completamente al azar, ANOVA. Los resultados del análisis se presentan en el cuadro 8.

Tabla 6 Índices de color a diferentes rangos de temperatura.

75-80 °C T_1	80-85 °C T_2	85-90 °C T_3	90-95 °C T_4
256	203	224	295
237	235	237	314
266	210	238	291



Gráfica 6 Influencia de la temperatura en la operación de decoloración.

La $F_c=4.07$ para una significancia $\alpha_e=5\%$, 3 y 8 g.l., para el experimento, $F_c=22.2$; puesto que $F_c > F_p$, entonces se rechaza la hipótesis nula H_0 y se acepta H_1 hipótesis alterna, concluyendo que existe diferencia estadística entre el color de los licores de azúcar tratados a diferentes temperaturas de proceso.

Para la prueba de Tuckey a un nivel de significancia del 5% el $DMSH=34.88$, la comparación entre las medias revela diferencia entre las siguientes $T_1 > T_2$, $T_4 > T_1$, $T_4 > T_2$, $T_4 > T_3$,

siendo no significativa para las restantes con lo que se puede concluir la existencia de diferencia significativa entre los diferentes rangos de temperatura del experimento.

Cuadro 8 ANOVA para índices de color a diferentes rangos de temperatura.

Fuente de Variación	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrados Medios	F _e
Tratamientos	3	11859	3953	22.2
Error	8	1424	178	
Total	11	13283		

La mayor remoción de colorantes se obtuvo en el rango de 80-85°C (gráfica 6) para la concentración de 0.3% de carbón activado, se apoya la hipótesis de trabajo donde la combinación tiempo-temperatura ofrecen los mejores resultados, por lo tanto, se determinó que las condiciones de trabajo para la decoloración en las siguientes fases de la experimentación serán de 0.25% concentración de carbón activado, 15 minutos tiempo de contacto y 80-85°C.

II.2. Segunda Fase Experimental

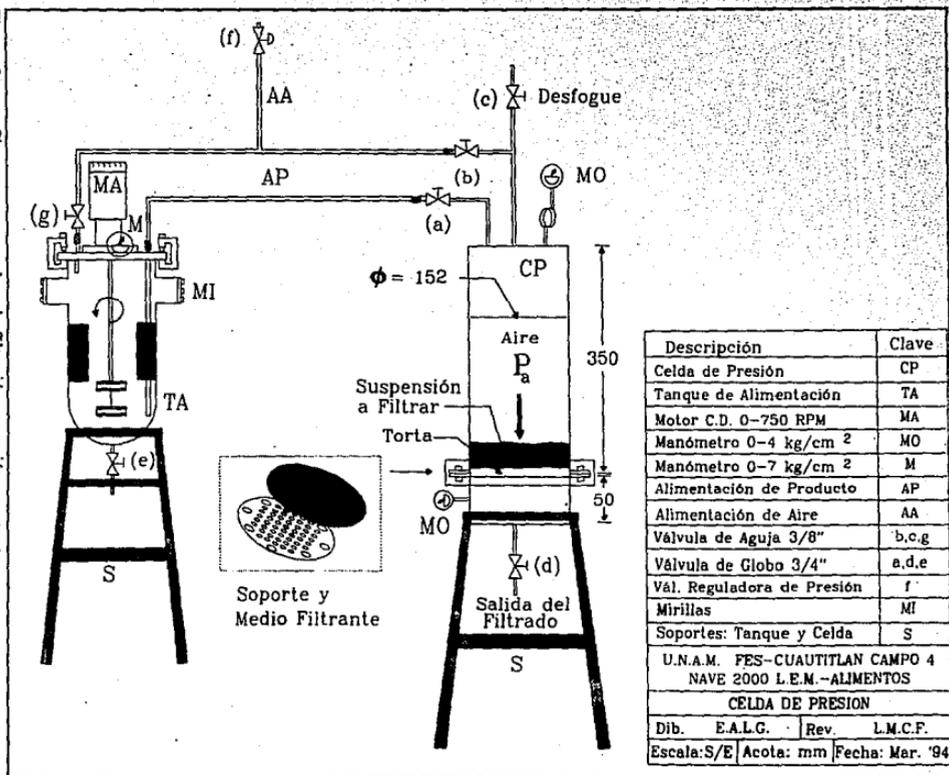
La siguiente fase de este trabajo se llevó a cabo con el fin de establecer las condiciones de filtración de jarabe a nivel laboratorio, como parte de la metodología de escalamiento, previamente descrita (pág 23). Para ello fue necesario trabajar con un equipo de filtración; celda de presión, desarrollado en el Laboratorio Experimental Multidisciplinario III Alimentos (FES-C UNAM), figura 9, que se utiliza con la finalidad de estudiar y caracterizar el comportamiento de suspensiones que se someten a filtración a presión.

No es posible escalar la operación a nivel piloto, debido a que el equipo a nivel laboratorio no posee la semejanza de tipo geométrica y/o dinámica con respecto al equipo piloto, cualidades requeridas para el escalamiento descritas por López y Johnstone [14,16], sin embargo, sí es posible establecer las bases para el soporte de los próximos experimentos a nivel piloto, continuando con el objetivo de optimizar el proceso de clarificación de jarabe de azúcar estándar en la operación de filtración.

En general el trabajo se desarrolló manteniendo constantes las condiciones de elaboración del jarabe así como sus características (pág 44), ya que como se recordará, es preciso mantener las condiciones de operación semejantes a las condiciones a nivel industrial (pág 23), mismas que se determinaron en los experimentos del 1 al 3.

A continuación se describen los experimentos de esta etapa.

Figura 9 Sistema para pruebas de filtración a presión constante.



II.2.1. Experimento 4: Determinación de la concentración de filtro ayuda en la dosificación para la clarificación del jarabe de azúcar estándar.

Objetivo: Determinar experimentalmente la concentración de filtro ayuda en la dosificación con la cual se genere una mayor velocidad de filtración.

Variables: °Bx, °T, concentración de decolorante, espesor de precapa, dosificación de filtro ayuda, medio filtrante, área de filtración, velocidad de filtración y parámetros de filtración (α, R_m).

V. Independiente: Dosificación de filtro ayuda.

V. Dependientes: Velocidad y parámetros de filtración (α, R_m).

V. Respuesta: Tiempo y volumen del filtrado recolectado.

V. Controladas: °Bx, °T, concentración de decolorante, espesor de precapa, área de filtración, medio filtrante.

Hipótesis: La dosificación de filtro ayuda modifica las características de la torta aumentando su permeabilidad, con lo que se accede a una mayor velocidad de filtración, pero existen restricciones, de manera que al aumentar demasiado esta concentración se incrementa el espesor de la torta; por otro lado una pobre dosificación contribuye al bloqueo de los canales o poros de la torta. En ambos casos se eleva la presión del sistema, reduciendo la velocidad y el tiempo del ciclo de filtración.

Hipótesis Estadística:

$$H_0: \mu_{D1} = \mu_{D2} = \mu_{D3} = \mu_{D4}$$

$$H_1: \text{al menos una } \mu_{D_i} \neq \mu_{D_j}$$

Materiales y Métodos:

Se preparó el jarabe siguiendo el procedimiento descrito en los experimentos 2 y 3. Se sometió a calentamiento hasta una temperatura de 80-85°C, misma que se estableció en el experimento 3 (pág 44); en la decoloración se empleó carbón activado a una concentración de 0.25% con respecto a sólidos de azúcar, que equivale a 1.93 kg/m³, determinada en el experimento 2. La remoción del carbón activado del jarabe se llevó a cabo por filtración.

En la filtración del jarabe se empleó una celda de presión figura 9, fabricada en acero inoxidable, como medio filtrante se utilizaron discos de 0.15 m de diámetro elaborados con malla de acero inoxidable 304 calibre 0.12 y 80x80 hilos por pulgada cuadrada, el área de filtración disponible fue de 0.176 m². Se trabajó con una precapa de filtro ayuda a base de *hy flo-supercel*, con espesor de 4 mm a una concentración de 1.14 kg/m², la filtración se llevó a cabo variando la concentración de filtro ayuda en la dosificación. Se manejaron cuatro niveles de variación; 0, 0.96, 1.93, 2.89 kg/m³, cantidades que representan el 0, 50, 100, y 150%, respectivamente del peso de carbón activado en la decoloración. Se hicieron tres repeticiones por nivel de variación.

La temperatura de la suspensión en la alimentación se mantuvo entre 75-80°C y la temperatura del filtrado en 40-55°C, la presión del sistema se sostuvo en 49 kPa (0.5 kg/cm²) en el cuerpo de la celda, y 88 kPa (0.9 kg/cm²) en el tanque de alimentación, de esta manera se propició un diferencial de presión entre el tanque y la celda de 39 kPa, haciendo posible la alimentación de la suspensión a la celda. Para la caracterización del proceso de filtración se tomaron tiempos de recolección para volúmenes de filtrado, los cuales se establecieron en cada 2.5x10⁻⁴ m³ hasta un volumen total de 3.25x10⁻³ m³.

Resultados

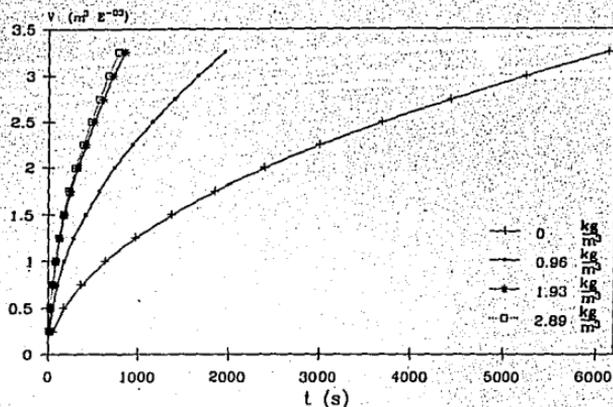
Los tiempos y volúmenes de filtrado recolectado de cada corrida fueron transformados en $\Delta t/\Delta v$ y V_p , velocidad promedio de filtración, para la obtención de los parámetros de filtración,

sección de fundamentos de filtración (pág 25). Los resultados de las corridas experimentales se presentan en la tabla 7, donde se puede notar que para las dosificaciones de 0.0 y 0.96 kg/m³ se obtienen parámetros de filtración muy altos, y en consecuencia velocidades de filtración muy bajas, por otro lado las dosificaciones de 1.93 y 2.89 kg/m³, presentan valores de velocidad y parámetros de filtración muy semejantes entre ellos. En la gráfica 7 se puede ver que la influencia de la concentración de filtro ayuda en la dosificación afecta directamente a la velocidad de filtración.

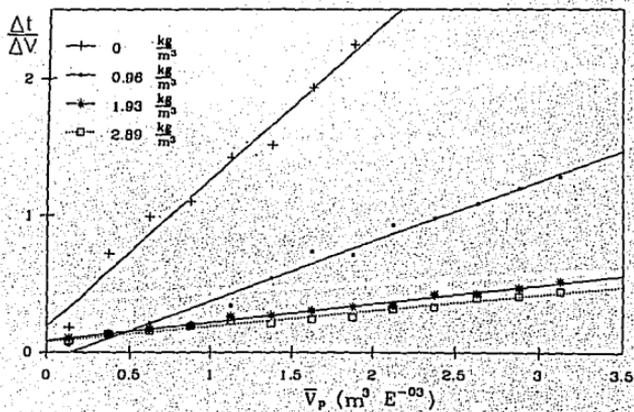
Tabla 7 Velocidad y parámetros de filtración para el jarabe de azúcar con diferentes dosificaciones de filtro ayuda.

Dosificación Nº de Repetición	Velocidad Promedio m ³ /sx10 ⁰⁶	α m/kgx10 ⁻¹⁰	R _m m ⁻¹ x10 ⁻⁰⁸	Coefficiente de Correlación @ $\Delta t/\Delta V$ vs V _p
0 kg/m³				
1	0.549	41.70	46.80	0.98
2	0.513	45.30	34.50	0.99
0.96 kg/m³				
1	1.42	11.30	0.385	0.98
2	2.03	7.90	0.387	0.99
3	1.68	9.53	0.967	0.99
1.93 kg/m³				
1	3.45	3.44	2.22	0.98
2	3.96	2.91	5.47	0.99
3	4.23	2.62	9.72	0.99
2.89 kg/m³				
1	4.16	2.16	8.38	0.98
2	6.45	1.35	7.67	0.99

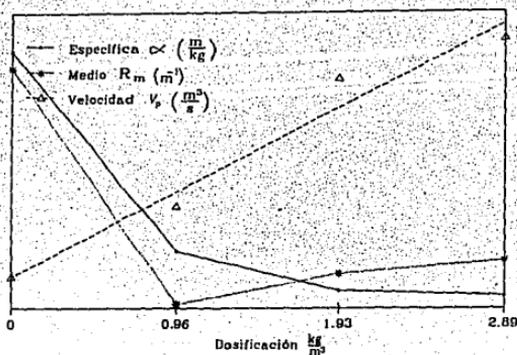
En la gráfica 8 y gráfica 9 observa la tendencia que siguen los parámetros de filtración con respecto a la dosificación de filtro ayuda.



Gráfica 7 Efecto de la dosificación en la velocidad de filtración.



Gráfica 8 Efecto de la dosificación de filtro ayuda en el inverso de la velocidad vs volumen promedio; nivel laboratorio.



Gráfica 9 Efecto de la dosificación en la velocidad y en los parámetros de filtración α y R_m .

Análisis de Resultados

Los datos de velocidad y parámetros de filtración se evaluaron estadísticamente con el diseño completamente al azar (ANOVA) para casos desbalanceados, a un nivel de significancia de $\alpha_E=5\%$, con 3 y 7 g.l., con lo que se obtiene de tablas $F=4.35$. Los resultados del análisis se presentan en el cuadro 9, cuadro 10, cuadro 11.

Velocidad

Para el experimento $F_c=9.6$, como $F_c > F_i$ la hipótesis nula H_0 se rechaza, aceptando la hipótesis alterna H_1 , por lo que existe diferencia estadística, lo que permite afirmar que la influencia de la dosificación en la velocidad de filtración es determinante. Por otro lado en la prueba de Tukey con el mismo nivel de significancia, el $DMSH=2.59 \times 10^{-06}$. Las medias que sobrepasan esta diferencia son: $D_1 < D_3$, $D_1 < D_4$, y $D_2 < D_4$, las demás comparaciones son no significativas, corroborando lo anterior, en la gráfica 7 se puede apreciar que la diferencia en la velocidad para D_3 y D_4 es muy pequeña reduciendo las expectativas de aumentar la concentración de filtro ayuda en la dosificación a nivel piloto.

Cuadro 9 ANOVA para la velocidad de filtración y diferentes dosificaciones de filtro ayuda en celda de presión.

Fuente de Variación	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrados Medios	F _c
Tratamientos	3	2.66 10 ⁻¹¹	8.85 10 ⁻¹²	9.6
Error	7	6.45 10 ⁻¹²	9.22 10 ⁻¹³	
Total	10	3.3 10 ⁻¹¹		

Resistencia Específica de la Tórt (α):

Para el experimento $F_c=429.6$, como $F_c > F_1$, la hipótesis nula H_0 se rechaza, aceptando la alterna H_1 , apoyando la diferencia estadística, que justifica la afirmación de la influencia de la dosificación en la resistencia específica de la torta. La prueba de Tuckey al mismo nivel de significancia, resulta en $DMSH=3.79 \times 10^{10}$. Las medias que presentan diferencia a este nivel son: $D_1 < D_2$, $D_1 < D_3$, $D_1 < D_4$, $D_2 < D_3$, y $D_2 < D_4$.

Cuadro 10 ANOVA para la resistencia específica de la torta (α) a diferentes dosificaciones.

Fuente de Variación	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrados Medios	F _c
Tratamientos	3	2.54 10 ²³	8.47 10 ²²	429.6
Error	7	1.38 10 ²¹	1.97 10 ²⁰	
Total	10	2.55 10 ²³		

La última comparación no es significativa con lo que nuevamente se apoya la hipótesis, que con respecto a la dosificación fue establecida, como se puede ver en la gráfica 9, la diferencia entre la resistencia específica de la torta (α) para D_3 y D_4 es mínima, con lo que se puede esperar que esta última sea la máxima, y que la torta haya alcanzado un valor máximo en la permeabilidad pero, debido a su espesor la velocidad tienda a mantenerse constante o por otro lado disminuir.

Resistencia del Medio:

$F_t=4.35$ para $\alpha_e=5\%$, 3 y 7 g.l., y para el experimento $F_c=49.96$ y $F_c>F_t$, por lo tanto la hipótesis nula H_0 se rechaza, aceptando la alterna H_1 , por lo que existe diferencia estadística entre la resistencia de medio a diferentes dosificaciones de filtro ayuda, para prueba de Tuckey, $DMSH=1 \times 10^{09}$. Las medias que presentan diferencia estadística son: $D_1 < D_2$, $D_1 > D_3$ y $D_1 > D_4$, y no presentando diferencia significativa en las demás combinaciones, este comportamiento se debe a que con una dosificación de 0 kg/m^3 se presenta un rápido bloqueo de los poros de la torta, aumentando su resistencia.

Cuadro II ANOVA para la resistencia del medio a diferentes dosificaciones.

Fuente de Variación	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrados Medios	F_c
Tratamientos	3	$2.19 \cdot 10^{19}$	$7.30 \cdot 10^{18}$	48.96
Error	7	$1.04 \cdot 10^{18}$	$1.49 \cdot 10^{17}$	
Total	10	$2.30 \cdot 10^{19}$		

Lo anterior permite concluir que el comportamiento de los parámetros de filtración y por ende la velocidad de filtración, dependen directamente de la dosificación, ya que con una pobre dosificación de filtro ayuda (0.0 a 0.96 kg/m^3) se reduce considerablemente la velocidad. Sin embargo con el incremento de la dosificación, la velocidad de filtración llegó hasta un punto máximo o crítico donde no presenta aumento significativo, ver gráfica 9, lo cual era esperado como se menciona en textos de Geankoplis, John's Manville y McCabe [8,15,18]. De esta forma se seleccionó a una dosificación de 1.93 kg/m^3 , para las próximas etapas de la experimentación.

II.2.2. Experimento 5: Influencia del tipo de medio filtrante en la clarificación de jarabe de azúcar estándar.

Objetivo: Determinar la influencia del tipo de medio filtrante en la velocidad de filtración del jarabe de azúcar estándar.

VARIABLES: °Bx, °T, concentración de decolorante, precapa, dosificación de filtro ayuda, área de filtración, velocidad de filtración, parámetros de filtración (α, R_m), medio filtrante.

V. Independiente: Tipo de medio filtrante.

V. Dependientes: Velocidad y parámetros de filtración (α, R_m).

V. Respuesta: Tiempo y volumen del filtrado recolectado.

V. Controladas: °Bx, °T, área de filtración, dosificación de filtro ayuda, concentración de decolorante, espesor de precapa, área de filtración, etc.

Hipótesis: El medio filtrante cumple una función importante, ya que no debe obstruirse o taponarse durante la operación, debe impedir la erosión de la torta, evitando una reducción en la capacidad de retención, y una baja calidad del filtrado. Durante el experimento se espera que un cambio en el medio filtrante tendrá poca influencia en la resistencia específica de la torta y por lo tanto en la velocidad de filtración, por lo que respecta a la resistencia del medio se espera que esta influencia sea insignificante debido a las semejanzas en los medios filtrantes en cuanto al material de construcción de ambos etc.

Hipótesis Estadística:

$$H_0: \mu_{M1} = \mu_{M2}$$

$$H_1: \mu_{M1} \neq \mu_{M2}$$

Materiales y Métodos:

Se mantuvo constante la metodología de elaboración y filtración del jarabe, como se describe en el experimento 4 (pág 48); dosificación de 1.93 kg/m^3 , filtro ayuda presión de 49 kPa , área de 0.176 m^2 , con volúmenes establecidos cada 2.5×10^{-04} hasta $3.25 \times 10^{-03} \text{ m}^3$. El experimento se realizó cambiando el medio filtrante, primero con malla de acero inoxidable 304, calibre 0.12; 80×80 hilos por pulgada, *Medio 1*, malla de acero inoxidable 304, cal 0.10; 100×100 hilos por pulgada, *Medio 2*.

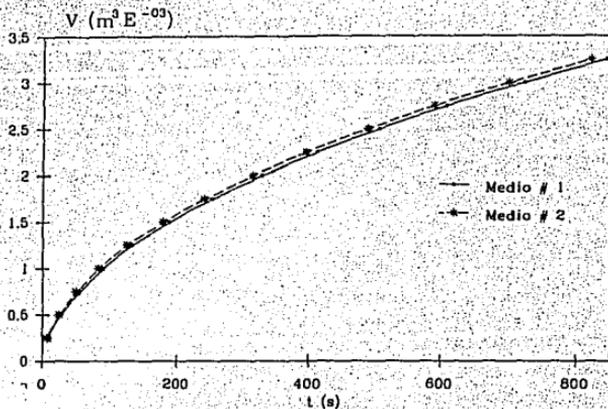
Resultados

Ambos medios filtrantes presentaron buenas características en la formación y retención de la precapa, ya que no hubo erosión de la torta, u obstrucción de los mismos, cualidades necesarias para un medio filtrante según mencionan Geankoplis, McCabe y Orr [8,18,19]. Los resultados de las corridas con los dos tipos de medios filtrantes, se presentan en la tabla 8, donde se puede ver que en ambos medios tanto la velocidad como los parámetros de filtración poseen valores semejantes.

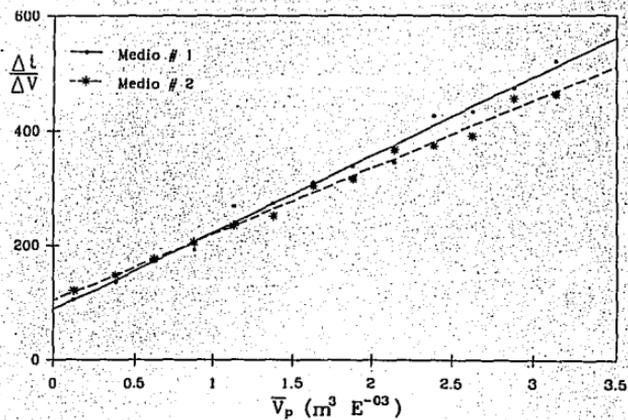
En la gráfica 10 y gráfica 11 se puede apreciar que la influencia del medio filtrante en la velocidad y en los parámetros de filtración es despreciable debido a las semejanzas en las curvas.

Tabla 8 Velocidad y parámetros de filtración con diferente medio filtrante.

Medio Filtrante Nº de Repetición	Velocidad Promedio $\text{m}^3/\text{s} \times 10^{06}$	α $\text{m}/\text{kg} \times 10^{-10}$	R_m $\text{m}^{-1} \times 10^{-08}$	Coefficiente de Correlación @ $\Delta t/\Delta V$ vs V_p
Medio 1 M_1				
1	3.44	3.44	2.22	0.98
2	3.96	2.91	5.47	0.99
3	4.23	2.62	9.72	0.99
Medio 2 M_2				
1	4.78	2.25	11.5	0.99
2	3.96	2.98	2.61	0.99
3	4.30	2.65	6.32	0.98



Gráfica 10 Efecto del medio filtrante en la velocidad de filtración.



Gráfica 11 Efecto del medio filtrante en las constantes de filtración α y R_m .

Análisis de Resultados

La velocidad de filtración y parámetros de filtración de cada corrida se analizaron estadísticamente con el diseño de ANOVA a un nivel de significancia de $\alpha_E=5\%$ y con 1 y 4 g.l., donde $F_1=7.71$. El resultado del análisis se presenta en el cuadro 12, cuadro 13 y cuadro 14.

Para el experimento $F_c=2$ y como $F_c < F_1$, por lo tanto se acepta la hipótesis nula H_0 , rechazando la alterna H_1 , concluyendo que no existe diferencia estadística en la velocidad de filtración con diferentes medios filtrantes, esto se puede apreciar en la gráfica 10 donde las curvas de velocidad para ambos medios filtrantes son semejantes.

Cuadro 12 ANOVA para la velocidad de filtración con medios de filtración diferentes.

Fuente de Variación	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrados Medios	F_c
Tratamientos	1	$3.31 \cdot 10^{13}$	$3.31 \cdot 10^{13}$	2
Error	4	$6.62 \cdot 10^{13}$	$1.65 \cdot 10^{13}$	
Total	5	$9.93 \cdot 10^{13}$		

Parámetros de Filtración:

El mismo análisis se llevó a cabo para la resistencia específica de la torta y la resistencia del medio no encontrándose significancia entre ambos medios de filtración.

En ambos casos la $F_1=7.71$, a una significancia de $\alpha_E=5\%$, con 1 y 4 g.l. siendo menor el valor de la F_c para cada parámetro de filtración del experimento. Con esto se confirma la hipótesis, debido a que la diferencia entre ambos medios filtrantes es muy pequeña o insignificante bajo estas condiciones de filtración.

Por lo que respecta al costo entre ambos materiales de filtración, existe una diferencia de más del 25% entre el *medio 1* uno con respecto al *medio 2*, con lo que para grandes áreas de filtración resulta mucho más económico el empleo del *medio 1*.

De esta forma se continuo con el *medio 1* como medio filtrante a en las fases siguientes a nivel piloto.

Cuadro 13 ANOVA para la resistencia especifica de la torta con diferentes medios filtrantes.

Fuente de Variación	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados.	Cuadrados Medios	F _c
Tratamientos	1	1.98 10 ¹⁹	1.98 10 ¹⁹	1.29
Error	4	6.13 10 ¹⁹	1.53 10 ¹⁹	
Total	5	8.11 10 ¹⁹		

Cuadro 14 ANOVA para la resistencia del medio (R_m) con diferentes medios filtrantes.

Fuente de Variación	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrados Medios	F _c
Tratamientos	1	1.52 10 ¹⁶	1.52 10 ¹⁶	0.01
Error	4	6.82 10 ¹⁷	1.70 10 ¹⁷	
Total	5	6.97 10 ¹⁷		

II.3. Tercera Fase Experimental

Una vez que se establecieron las bases para el trabajo a nivel piloto se procedió al estudio de la operación bajo los siguientes objetivos.

Optimizar el proceso de clarificación y decoloración de jarabe de azúcar estándar a 60 °Bx, estableciendo las mejores condiciones de operación a nivel piloto.

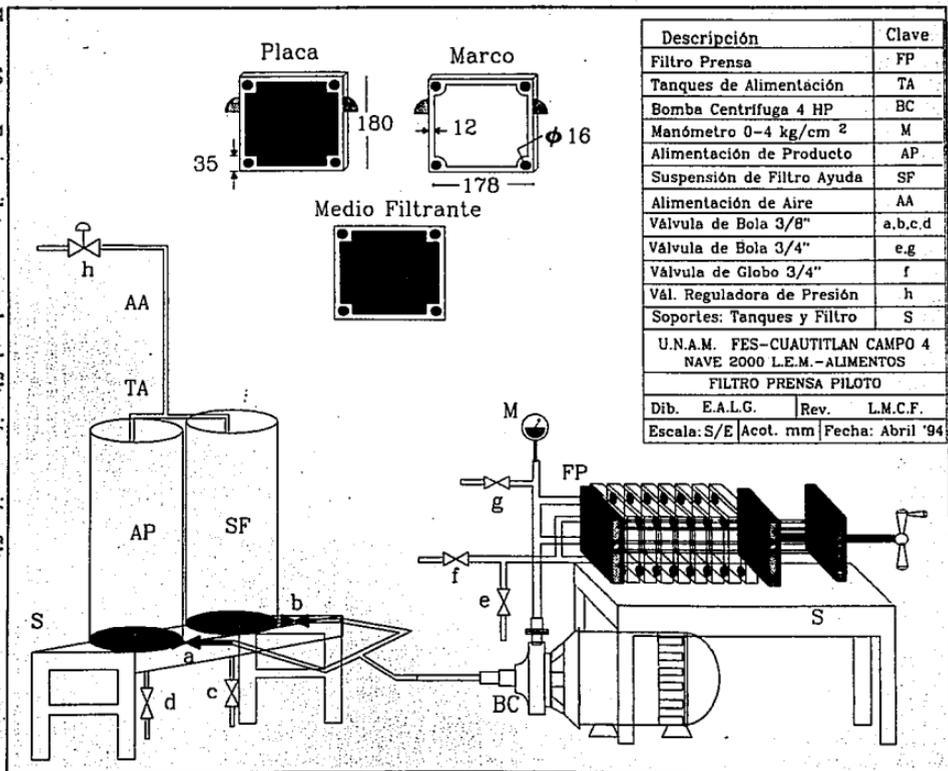
Evaluar y caracterizar la operación de filtración de jarabe decolorado en función de la velocidad y parámetros de filtración a partir de un filtro prensa como equipo piloto.

Establecer las bases para el escalamiento del proceso de clarificación y decoloración de jarabe de azúcar estándar a 60 °Bx a partir de las condiciones encontradas a nivel piloto.

Como equipo piloto, se trabajó con un filtro prensa, de marcos y placas marca Shriver, que opera a una presión máxima de diseño de 14 kg/cm², contiene 7 marcos y 7 placas de 0.18 m por lado, con lo cual es posible manejar el área de filtración, cuenta con un manómetro de carátula de 0-4 kg/cm² para medir la presión del fluido a la entrada, incluye una bomba centrífuga con impulsor abierto y potencia de 4 HP, la presión de operación de la bomba es; 0.3 a 1.6 kg/cm²; el equipo a nivel piloto se ilustra en la figura 10. Cada experimento se llevó a cabo bajo un procedimiento general de filtración, con el cual solo se involucró la variable en estudio. A continuación se detalla cada experimento.

Figura 10 Equipo piloto para pruebas de filtración a presión, filtro prensa

60



II.3.1. Experimento 6:

Determinación del espesor de precapa para la clarificación del jarabe de azúcar.

Objetivos:

Determinar experimentalmente el espesor de precapa a ser utilizado en la operación de filtración que genere una mayor velocidad de filtración.

Evaluar el comportamiento de los parámetros de filtración (α y R_m) a diferentes espesores de precapa para la filtración del jarabe a nivel piloto.

Variables: °Bx, °T, concentración de decolorante, $-\Delta P$, espesor de precapa, dosificación de filtro ayuda, área de filtración, velocidad de filtración, parámetros de filtración (α, R_m).

V. Independiente: Espesor de precapa.

V. Dependientes: Velocidad y parámetros de filtración (α, R_m).

V. Respuesta: Tiempo y volumen del filtrado recolectado.

V. Controladas: °Bx, °T, $-\Delta P$, área de filtración, dosificación de filtro ayuda, concentración de decolorante.

Hipótesis: Los objetivos de la formación de precapa son impartir claridad al filtrado, evitar que los medios filtrantes sean obstruidos por impurezas, facilitando su limpieza. Sin embargo, trabajar con un espesor de precapa no adecuado, provocará que al aumentar este espesor, se afecte la velocidad de filtración, reduciéndola para un sistema a presión constante, de tal manera que se obtengan tiempos de ciclo muy cortos. Por otro lado al reducir demasiado este espesor, la velocidad aumentará pudiendo resultar en una pobre claridad debido a la presencia de sólidos suspendidos en el producto final, por lo que se determinará el espesor menor de precapa que resulte operativo.

Hipótesis estadística:

$$H_0: \mu_{L1} = \mu_{L2} = \mu_{L3}$$

H_1 : al menos una $\mu_{L_i} \neq \mu_{L_j}$

Materiales y Métodos

El jarabe de azúcar fue preparado y decolorado siguiendo la metodología descrita en los experimentos 2 al 5. La clarificación se llevó a cabo por filtración a presión, empleando el equipo piloto (filtro prensa, pág 59), e ilustrado en la figura 10, para la remoción del decolorante suspendido en el jarabe.

Como medio filtrante se adaptaron cuadros de 0.18 m de lado elaborados con neopreno como material de empaque y como se determinó en el experimento 5, malla de acero inoxidable 304, calibre 0.12; 80x80 hilos por pulgada, el área de filtración por marco y placa fue de 0.04405 m².

El experimento se desarrolló variando la concentración de filtro ayuda empleado en la formación de precapa, con 3 niveles de variación y tres repeticiones, las cantidades empleadas fueron de 0.85, 1.14, y 1.42 kg/m² que corresponden a la formación de espesores de 3,4, y 5 mm respectivamente [15], cabe mencionar que los espesores propuestos inicialmente eran de 1,2,3,4, y 5 mm, sin embargo, no fue factible trabajar con espesores menores a 3 mm debido a que la precapa no se edificó con estas concentraciones, por lo que fue necesario recorrer el rango inferior de los niveles de variación. Se trabajó con una dosificación de 1.93 kg/m³, la cual se había determinado en el experimento 4, de la filtración a nivel laboratorio, la presión del sistema se mantuvo constante en 49 kPa, mientras que la temperatura inicial se mantuvo entre 75-80°C, la temperatura del filtrado entre 55-68°C. Para la caracterización del proceso de filtración de jarabe se tomaron tiempos de recolección para volúmenes de filtrado establecidos cada 5.0x10⁻⁰⁴ m³ hasta un volumen final de 1.0x10⁻⁰² m³, los volúmenes y tiempos de filtración obtenidos, fueron convertidos en $\Delta V/\Delta V$ y V_p , para obtener los parámetros de filtración (pág 25).

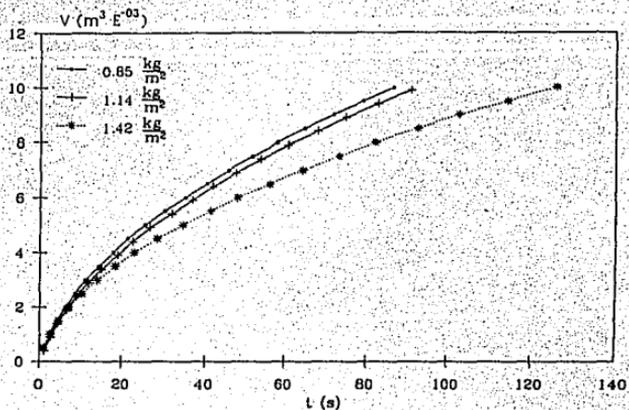
Resultados

Los resultados de las corridas de filtración con diferentes espesores de precapa se presentan en la tabla 9, donde se puede observar que la velocidad de filtración disminuyó proporcionalmente con el aumento del espesor de precapa, en los parámetros de filtración también se registró un incremento principalmente en la resistencia específica de la torta.

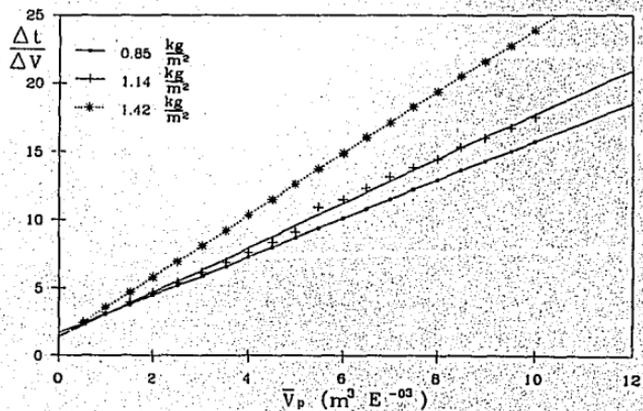
Tabla 9 Valores de velocidad y parámetros de filtración a diferentes espesores de precapa a nivel piloto.

Concentración Nº de Repetición	Velocidad Promedio $m^3/s \times 10^{04}$	α $m/kg \times 10^{-10}$	R_m $m^{-1} \times 10^{08}$	Coefficiente de Correlación @ $\Delta t/\Delta V$ vs V_p
0.85 kg/m ²				
1	1.36	0.55	7.32	0.98
2	1.23	0.62	8.11	0.98
3	1.04	0.83	5.34	0.99
1.14 kg/m ²				
1	1.17	0.73	5.02	0.99
2	1.15	0.69	7.39	0.99
3	1.14	0.71	6.90	0.99
1.42 kg/m ²				
1	0.82	1.07	6.24	0.99
2	0.65	1.42	4.88	0.98

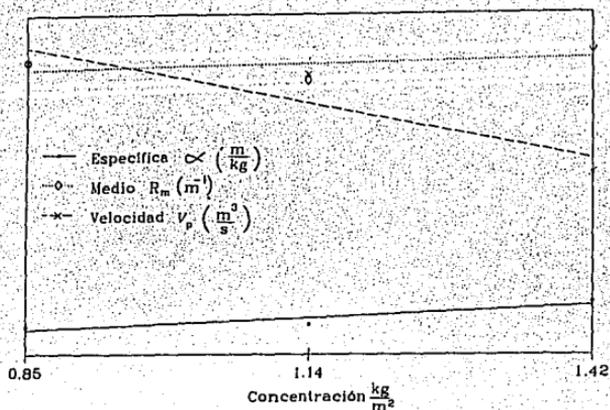
En la gráfica 12 se observa que existe influencia del espesor de precapa sobre la velocidad de filtración, ya que para una concentración de 0.85 kg/m² la velocidad es mayor que para una de 1.42 kg/m², en la gráfica 13 se muestra el mismo comportamiento en la relación del inverso de la velocidad contra el volumen promedio debido a que la pendiente de las curvas son diferentes. En la gráfica 14 se muestra una tendencia ascendente del comportamiento de los parámetros de filtración con respecto al espesor de la precapa; en la misma se puede apreciar que la velocidad disminuye de manera inversamente proporcional al valor de la resistencia específica de la torta (α), mientras que la resistencia del medio (R_m) sigue la misma tendencia ascendente.



Gráfica 12 Influencia del espesor de precapa en la velocidad de filtración.



Gráfica 13 Efecto del espesor de precapa en la curva del inverso de la velocidad vs volumen promedio.



Gráfica 14 Variación de los parámetros y velocidad de filtración con el espesor de precapa.

Análisis de Resultados

La velocidad y los parámetros de filtración de cada corrida se analizaron estadísticamente con un diseño completamente al azar (ANOVA), a un nivel de significancia de $\alpha_E=5\%$, teniendo 2 y 7 grados de libertad para el experimento, se encuentra el valor en tablas de $F=5.79$.

Los resultados para la velocidad de filtración, resistencia específica de la torta (α) y la resistencia del medio (R_m) se presentan en cuadro 15, cuadro 16, y cuadro 17 respectivamente.

Cuadro 15 ANOVA para la velocidad de filtración a diferentes espesores de precapa.

Fuente de Variación	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrados Medios	F_e
Tratamientos	2	$3.04 \cdot 10^{-09}$	$1.52 \cdot 10^{-09}$	11.4
Error	5	$6.67 \cdot 10^{-10}$	$1.33 \cdot 10^{-10}$	
Total	7	$3.71 \cdot 10^{-09}$		

En el análisis de la velocidad de filtración $F_c=11.4$; $F_1 < F_c$ por lo tanto existe diferencia significativa, confirmando lo que se aprecia en las gráficas, por otro lado la prueba de Tuckey resultó el $DMSH=3.1 \times 10^{-05}$ con la cual las comparaciones indican que el espesor L_3 marca la diferencia con respecto a los otros espesores L_1 y L_2 .

Cuadro 16 ANOVA para la resistencia específica de la torta (α) a diferentes espesores de precapa.

Fuente de Variación	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrados Medios	F_c
Tratamientos	2	$4.71 \cdot 10^{19}$	$2.35 \cdot 10^{19}$	11.2
Error	5	$1.05 \cdot 10^{19}$	$2.11 \cdot 10^{18}$	
Total	7	$5.76 \cdot 10^{19}$		

Resistencia Específica de la Torta (α)

$F_c=11.2$; $F_1 < F_c$ por lo tanto existe diferencia significativa, como se aprecia en la gráfica 14, sin embargo, esta diferencia se manifiesta debido a la media del espesor L_3 , definido con la prueba de Tuckey donde el $DMSH=3.9 \times 10^0$.

Cuadro 17 ANOVA para las resistencias del medio a diferentes espesores de precapa.

Fuente de Variación	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrados Medios	F_c
Tratamientos	2	$2.24 \cdot 10^{16}$	$1.12 \cdot 10^{16}$	0.69
Error	5	$8.13 \cdot 10^{16}$	$1.63 \cdot 10^{16}$	
Total	7	$1.04 \cdot 10^{17}$		

Resistencia del Medio (R_m)

$F_c=0.7$; $F_1 > F_c$ aceptando la hipótesis nula, y concluye que no existe diferencia estadística que permita diferenciar la influencia del espesor de precapa en la resistencia del medio.

Cabe recordar que el objetivo de la precapa es; proporcionar claridad inmediata al filtrado, lo que significa eliminar del fluido sólidos suspendidos, ya sea de manera parcial o hasta donde el proceso lo requiera. Esta claridad depende del espesor de la precapa, como lo citan varios autores [8,11,15,17]. Durante la primera etapa de experimentación se trabajó con un espesor de precapa de 3 mm para la separación del carbón, obteniéndose resultados muy aceptables, por lo tanto no se llevó a cabo la evaluación del contenido de color en el licor, ya que no fue posible trabajar con espesores menores a 3 mm, dichos espesores pudieron haber causado problemas de turbiedad al filtrado. Por otro lado se sabe que la mayoría de los colorantes presentes en el jarabe de azúcar, son muy solubles [1,4,12,20] y la remoción de estos depende directamente de la concentración de carbón activado, la cual fue mantenida constante durante todos los experimentos de filtración.

Para resumir podría decirse, que es posible utilizar espesores de precapa de 3 a 4 mm al iniciar un ciclo de filtración, lo cual se aprecia en la gráfica 14, donde se manifiesta un sensible aumento de la velocidad con la reducción del espesor de precapa, por lo tanto al emplear una precapa con 3 mm de espesor la velocidad será mayor que con 4 mm. Existe una ventaja más, la cual radica en el costo del proceso, ya que sería menor el costo al reducir las cantidades de filtro ayuda, lo cual será representativo en grandes áreas de filtración. Por lo tanto, para los siguientes experimentos se trabajó con un espesor de precapa de 3 mm o 0.85 kg/m².

II.3.2. Experimento 7: Determinación de la dosificación de filtro ayuda en la clarificación del jarabe de azúcar.

Objetivos:

Determinar experimentalmente la concentración de filtro ayuda a ser utilizado como dosificación en la operación de filtración, que genere una mayor velocidad de filtración.

Evaluar el comportamiento de los parámetros de filtración (α y R_m) a diferentes dosificaciones de filtro ayuda en la operación a nivel piloto.

Variabes: °Bx, °T, ΔP , concentración de decolorante, espesor de precapa, dosificación de filtro ayuda, medio filtrante, área, velocidad y parámetros de filtración (α, R_m).

V. Independiente: Dosificación de filtro ayuda.

V. Dependientes: Velocidad y parámetros de filtración (α, R_m).

V. Respuesta: Tiempo y volumen de filtrado recolectado.

V. Controladas: °Bx, °T, ΔP , concentración de decolorante, área de filtración, espesor de precapa, medio filtrante.

Hipótesis: La dosificación de filtro ayuda modifica las características de la torta aumentando su permeabilidad, con lo que se accede a una mayor velocidad de filtración, pero existen restricciones, de manera que al aumentar demasiado esta concentración se incrementa el espesor de la torta; por otro lado una pobre dosificación contribuye al bloqueo de los poros de la torta. En ambos casos se eleva la presión del sistema, reduciendo la velocidad y el ciclo de filtración, con lo que es muy importante la selección de la dosificación que permita la operación a una mayor velocidad de filtración.

Hipótesis estadística:

$$H_0: \mu_{D1} = \mu_{D2} = \mu_{D3} = \mu_{D4} = \mu_{D5}$$

$$H_1: \text{al menos una } \mu_{D_i} \neq \mu_{D_j}$$

Materiales y Métodos

Se continuaron con la metodología de preparación y decoloración descrita en los experimentos anteriores; para la filtración del jarabe, se utilizó el equipo piloto de filtración junto con el medio filtrante descrito previamente. Se partió de los resultados obtenidos en los experimentos 4 y 6; la experimentación se llevó a cabo empleando una precapa de filtro ayuda con espesor de 3 mm ó 0.85 kg/m², variando la concentración de filtro ayuda en la dosificación con 5 niveles de variación y tres repeticiones, las concentraciones empleadas fueron 1.15, 1.54, 1.93, 2.89, y 3.85 kg/m³ que corresponden al 50, 80, 100, 150, y 200 % del peso con respecto al carbón activado.

La presión del sistema se controló en 49 kPa; la temperatura inicial de la suspensión entre 72-80°C y la temperatura del filtrado entre 55-72°C. Durante la filtración del jarabe se tomaron tiempos de recolección para volúmenes de filtrado establecidos cada 5.0x10⁻⁰⁴ m³ hasta un volumen final de 1.0x10⁻⁰² m³, para la caracterización de la operación, los volúmenes y tiempos de filtración obtenidos fueron convertidos en $\Delta t/\Delta V$ y V_p , para la obtención de los parámetros de filtración del procedimiento experimental de filtración (pág 25).

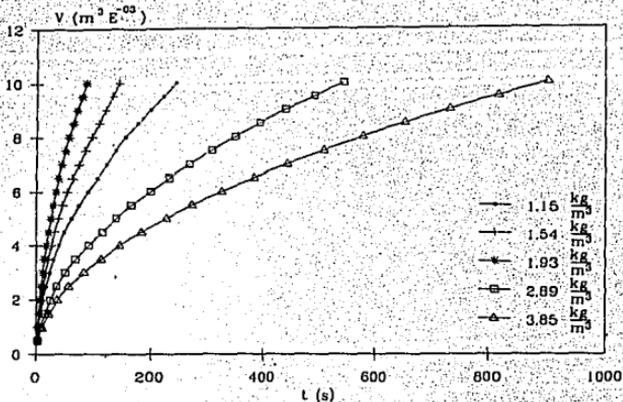
Resultados

Los resultados de las pruebas con diferentes dosificaciones de filtro ayuda se presentan en la tabla 10, donde se puede percibir que el aumento de filtro ayuda en la dosificación afecta a los parámetros de filtración, principalmente a la resistencia específica de la torta y por ende a la velocidad de filtración, lo más importante es observar que existe un punto donde esta resistencia disminuye para después aumentar, siendo aquí el punto de interés de la experimentación debido a que es en este lugar es donde se obtienen las velocidades de filtración mayores.

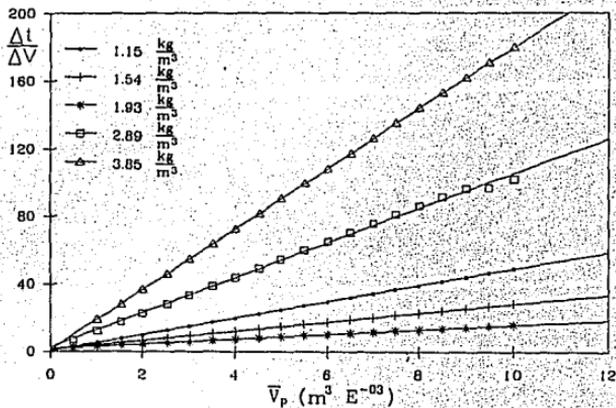
Tabla 10 Velocidad y parámetros de filtración para diferentes dosificaciones a nivel piloto.

Dosificación Nº de Repetición	Velocidad Promedio $m^3/s \times 10^4$	α $m/kg \times 10^{10}$	R_m $m^{-1} \times 10^{-08}$	Coefficiente de Correlación @ $\Delta t/\Delta V$ vs V_p
1.15 kg/m³				
1	0.54	2.20	0.43	0.99
2	0.20	6.23	1.45	0.98
3	0.40	1.90	4.10	0.99
1.54 kg/m³				
1	0.46	2.37	1.64	0.99
2	0.80	1.18	7.67	0.98
3	1.26	0.69	7.22	0.98
1.93 kg/m³				
1	1.36	0.56	7.32	0.98
2	1.23	0.62	8.11	0.98
3	1.04	0.83	5.34	0.99
2.89 kg/m³				
1	0.11	6.90	1.24	0.99
2	0.70	1.14	0.59	0.98
3.85 kg/m³				
1	0.12	5.40	3.89	0.98
2	0.11	5.90	4.52	0.99

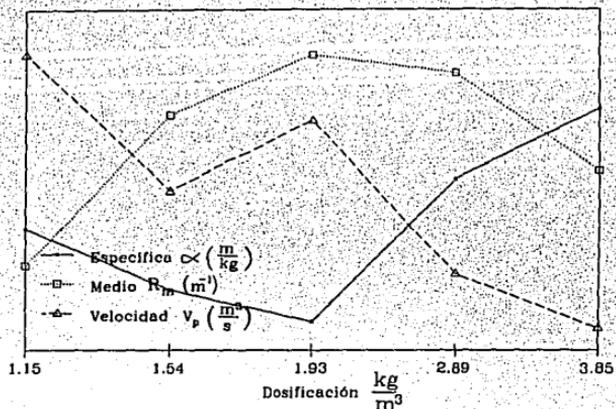
En la gráfica 15 se puede observar una influencia determinante por parte de la dosificación sobre la velocidad de filtración, sobretodo en los extremos de la curva donde se nota una reducción de la velocidad de filtración. En la gráfica 16 se muestra la relación entre el inverso de la velocidad contra el volumen promedio para las diferentes dosificaciones, de esta relación se obtienen los parámetros de filtración (α y R_m). Por otro lado en la gráfica 17 se presenta la tendencia que siguen tanto los parámetros como la velocidad de filtración.



Gráfica 15 Influencia de la dosificación de filtro ayuda en la velocidad de filtración.



Gráfica 16 Efecto de la dosificación en la curva del inverso de la velocidad vs volumen promedio.



Gráfica 17 Efecto de la dosificación en el comportamiento de la velocidad y los parámetros de filtración (α y R_m).

Análisis de Resultados

Los resultados de velocidad y parámetros de filtración se analizaron con un diseño completamente al azar, a un nivel de significancia de $\alpha_p=5\%$. Con este nivel y los grados de libertad del experimento se obtiene una $F_t=3.84$ que será igual para la comparación de los análisis estadísticos. Los resultados para la velocidad, resistencia específica de la torta y la resistencia del medio se presentan en el cuadro 18, cuadro 19, y cuadro 20 respectivamente.

Para la velocidad de filtración $F_t=0.73$; $F_t > F_c$ se acepta la hipótesis nula; para la resistencia específica de la torta $F_t=2.05$; $F_t > F_c$ se acepta la hipótesis nula; y para la resistencia del medio; la $F_t=0.86$, $F_t > F_c$ se acepta la hipótesis nula.

En los tres análisis, la herramienta estadística no aporta datos para determinar si existe diferencia, sin embargo en la gráfica 15 y gráfica 17 se puede apreciar que la influencia es muy clara y determinante, ya que a una dosificación de 1.93 kg/m^3 , se tiene como resultado una mayor velocidad con parámetros de filtración (α, R_m) menores, producto de modificaciones en la estructura

de la torta que le imparten una mayor porosidad que a diferentes dosificaciones, por otro lado con dosificaciones superiores a 1.93 kg/m^3 , se afecta el espesor de la torta provocando su aumento, por lo tanto aumenta las resistencias y se presenta la reducción de la velocidad.

Cuadro 18 ANOVA para la velocidad de filtración para diferentes dosificaciones de filtro ayuda.

Fuente de Variación	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrados Medios	F_c
Tratamientos	4	$3.33 \cdot 10^{-08}$	$8.31 \cdot 10^{-09}$	0.73
Error	8	$9.10 \cdot 10^{-08}$	$1.14 \cdot 10^{-08}$	
Total	12	$1.24 \cdot 10^{-07}$		

Cuadro 19 ANOVA para la resistencia específica de la torta (α) para diferentes dosificaciones de filtro ayuda.

Fuente de Variación	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrados Medios	F_c
Tratamientos	4	$3.82 \cdot 10^{21}$	$9.56 \cdot 10^{20}$	2.06
Error	8	$3.71 \cdot 10^{21}$	$4.64 \cdot 10^{20}$	
Total	12	$7.54 \cdot 10^{21}$		

Cuadro 20 ANOVA para la resistencia del medio para diferentes dosificaciones de filtro ayuda.

Fuente de Variación	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrados Medios	F_c
Tratamientos	4	$4.47 \cdot 10^{17}$	$1.12 \cdot 10^{17}$	0.86
Error	8	$1.04 \cdot 10^{18}$	$1.30 \cdot 10^{17}$	
Total	12	$1.48 \cdot 10^{17}$		

Lo anterior resulta muy importante para las operaciones de filtración, debido a que se busca trabajar con la resistencia específica de la torta más baja posible, que permita al proceso, desarrollarse a velocidades de filtración mayores, lo cual se consigue con el manejo de la dosificación [15]. Por lo anterior se determinó continuar con el trabajo, utilizando esta dosificación de 1.93 kg/m^3 .

II.3.3. Experimento 8:

Evaluación del tipo de medio filtrante para la clarificación de jarabe de azúcar a nivel piloto.

Objetivos:

Evaluar experimentalmente el comportamiento de los parámetros de filtración (α y R_m) con dos tipos de medio filtrante, eligiendo aquel que induzca una mayor velocidad de filtración.

Variables: °Bx, °T, ΔP , concentración de decolorante, espesor de precapa, dosificación de filtro ayuda, área de filtración, velocidad de filtración, medio filtrante, parámetros de filtración (α, R_m).

V. Independiente: Medio filtrante.

V. Dependientes: Velocidad y parámetros de filtración (α, R_m).

V. Respuesta: Tiempo y volumen de recolección de filtrado.

V. Controladas: °Bx, °T, ΔP , área de filtración, dosificación de filtro ayuda, concentración de decolorante espesor de precapa.

Hipótesis: El medio filtrante cumple una función importante, ya que sirve como soporte de la torta, por lo que no debe obstruirse o taponarse durante la operación, debe impedir la erosión de la torta, evitando una reducción en la capacidad de retención de partículas, así como una baja calidad del filtrado. Durante el experimento se espera que un cambio en el medio filtrante tenga poca influencia en la resistencia específica de la torta y por lo tanto en la velocidad de filtración, por lo que respecta a la resistencia del medio se espera que esta influencia sea insignificante debido a la semejanza en el material de construcción de ambos medios filtrantes.

Hipótesis estadística:

$$H_0: \mu_{M1} = \mu_{M2}$$

$$H_1: \mu_{M1} \neq \mu_{M2}$$

Materiales y Métodos

La preparación y decoloración del jarabe de azúcar se mantuvo constante continuando con la metodología de los experimentos anteriores. La filtración del jarabe se llevó a cabo utilizando el equipo a nivel piloto, descrito en la página 59, e ilustrado en la figura 10.

Se adaptaron diferentes medios filtrantes elaborados con neopreno como material de empaque, para el *Medio 1* se empleó malla de acero inoxidable 304, calibre 0.12; 80x80 hilos por pulgada, para el *Medio 2* se utilizó malla de acero inoxidable 304, calibre 0.10; 100x100 hilos por pulgada. El área de filtración en ambos casos se mantuvo constante, así mismo las pruebas de filtración se llevaron a cabo por triplicado bajo las mismas condiciones de operación.

Durante éste experimento se trabajó con una precapa de 0.85 kg/m² y una dosificación de 1.93 kg/m³ determinados en los experimentos 6 y 7. La presión del sistema se mantuvo constante en 49 kPa, la temperatura inicial del jarabe se mantuvo entre 77-80°C, la temperatura del filtrado entre 60-68°C. La caracterización del proceso se llevó a cabo bajo el procedimiento de filtración descrito anteriormente (pág 25). Se establecieron volúmenes cada 5.0x10⁻⁰⁴ m³ hasta un volumen final de 1.0x10⁻⁰² m³, los volúmenes y tiempos de filtración fueron convertidos en $\Delta t/\Delta V$ y V_p , para ser graficados y obtener los parámetros de filtración.

Resultados

Los resultados de las corridas con diferentes medios se presentan en la tabla 11, donde se puede distinguir una pequeña diferencia entre los valores de los parámetros de filtración en ambos medios filtrantes, las cuales generaron diferencias en la velocidad de filtración. En la gráfica 18 se observa que la influencia del medio filtrante sobre la velocidad de filtración en el equipo a nivel

piloto es significativa debido a las diferencias en las curvas de velocidad bajo iguales condiciones de operación.

Tabla 11 Resultados de velocidad y parámetros de filtración para diferentes medios filtrantes a nivel piloto.

Medio Filtrante Nº Repetición	Velocidad Promedio $m^3/s \times 10^04$	α $m/kg \times 10^{-10}$	R_m $m^{-1} \times 10^{-08}$	Coefficiente de Correlación @ $\Delta t/\Delta V$ vs V_p
<i>Medio 1</i>				
1	1.36	0.56	7.32	0.98
2	1.23	0.62	8.11	0.98
3	1.04	0.83	5.34	0.99
<i>Medio 2</i>				
1	0.84	1.11	3.57	0.98
2	0.67	1.46	1.31	0.98
3	0.58	1.60	4.71	0.98

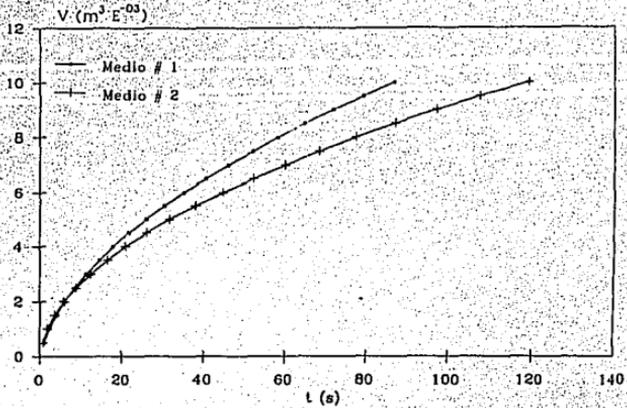
En la gráfica 19 se presenta la relación entre el inverso de la velocidad contra el volumen promedio para los diferentes medios filtrantes, nuevamente se observa diferencia en los parámetros de filtración α y R_m , tendencia que se presenta en la gráfica 20.

Análisis de Resultados

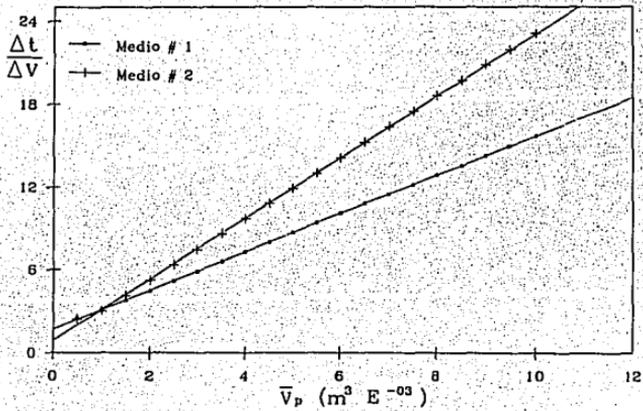
La velocidad y los parámetros de filtración se analizaron estadísticamente con el diseño completamente al azar (ANOVA), los resultados se presentan en el cuadro 21, cuadro 22, y cuadro 23 respectivamente. Los resultados de los tratamientos estadísticos se compararon a un nivel de significancia de $\alpha_E=5\%$, con los grados de libertad del experimento; $F_1=7.71$.

Velocidad de Filtración

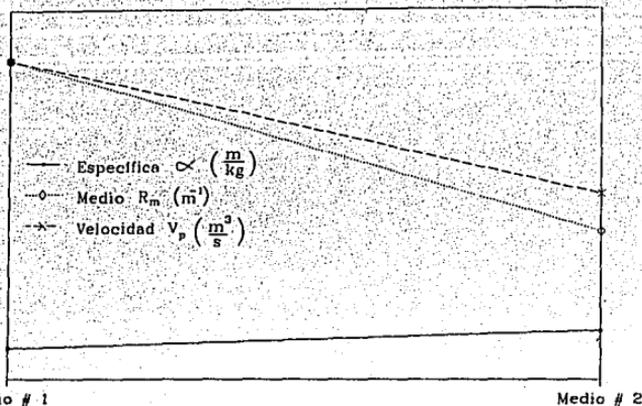
$F_c=18.1$, por lo tanto $F_1 < F_c$ se rechaza H_0 y acepta H_1 ; en la gráfica 18 se aprecia que la curva de velocidad de filtración para la *medio 1* tiene una pendiente mayor que la curva del *medio 2*, quizá debido a que la resistencia específica de la torta es ligeramente mayor que para el *medio 1*.



Gráfica 18 Curva de velocidad de filtración para diferentes medios filtrantes.



Gráfica 19 Curva del inverso de la velocidad vs volumen promedio para diferentes medios filtrantes.



Gráfica 20 Velocidad y parámetros de filtración para diferentes medios filtrantes.

Cuadro 21 ANOVA para la velocidad de filtración con diferentes medios filtrantes.

Fuente de Variación	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrados Medios	F _c
Tratamientos	1	3.91 10 ⁻⁰⁹	3. 3.91 10 ⁻⁰⁹	18.1
Error	4	8.65 10 ⁻¹⁰	2.16 10 ⁻¹⁰	
Total	5	4.77 10 ⁻⁰⁹		

Resistencia Específica de la Torta α

$F_c=0.65$, por lo tanto $F > F_c$, se acepta H_0 y se rechaza H_1 , en la gráfica 20 se aprecia que el valor de la resistencia específica de la torta en ambos medios es no significativa, con lo que las características de la torta para estas condiciones no se ven afectadas.

Resistencia del Medio

$F_c=8.28$, se rechaza H_0 y acepta H_1 , esto no era lo que se esperaba, debido a que la estructura

ESTA TESIS NO DEBE SALIR DE LA BIBLIOTECA

de ambos medios son semejantes, aunque aberturas en el *medio 2* son ligeramente más estrechas que en el *medio 1*, con lo que ofrecería una mayor resistencia al flujo, en la gráfica 20 se aprecia que el valor del R_m es menor en el *medio 2*, a pesar de esto se optó por el *medio 1*, ya que como se puede ver en la tabla 11 el valor de la resistencia específica de la torta es menor y por lo tanto una mayor velocidad de filtración.

Cuadro 22 ANOVA para la resistencia específica de la torta para diferentes medios filtrantes.

Fuente de Variación	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrados Medios	F_c
Tratamientos	1	$2.28 \cdot 10^{19}$	$2.28 \cdot 10^{19}$	0.65
Error	4	$1.39 \cdot 10^{20}$	$3.48 \cdot 10^{19}$	
Total	5	$1.62 \cdot 10^{20}$		

Cuadro 23 ANOVA para la resistencia del medio para diferentes medios filtrantes.

Fuente de Variación	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrados Medios	F_c
Tratamientos	1	$2.08 \cdot 10^{17}$	$2.08 \cdot 10^{17}$	8.28
Error	4	$1.01 \cdot 10^{17}$	$2.51 \cdot 10^{16}$	
Total	5	$3.09 \cdot 10^{17}$		

IL3.4, Experimento 9:

Influencia de la Presión en la Operación de Filtración y Clarificación de Jarabe.

Objetivo:

Evaluar experimentalmente el comportamiento de los parámetros de filtración (α y R_m) a diferentes caídas de presión como instrumento de escalamiento.

VARIABLES: °Bx, °T, $-\Delta P$, concentración de decolorante, espesor de precapa, dosificación de filtro ayuda, medio filtrante, área, velocidad y constantes de filtración (α, R_m).

V. Independiente: $-\Delta P$.

V. Dependientes: Velocidad y parámetros de filtración (α, R_m).

V. Respuesta: Tiempo y volumen de filtrado recolectado.

V. Controladas: °Bx, °T, espesor de precapa, medio filtrante, dosificación de filtro ayuda, área de filtración.

Hipótesis: Para sólidos granulares donde se forma una torta con estructura rígida conocida como incompresible la presión del sistema influye directamente en la velocidad de filtración, por el contrario con una torta compresible la influencia de la presión en la velocidad es prácticamente despreciable debido a las características de la torta, por lo tanto al aumentar la presión aumenta la compresibilidad junto con la resistencia específica, reduciendo la velocidad. Con el empleo de filtro ayuda a base de diatomita se induce a la formación de una torta incompresible, por lo que se espera que en el experimento la influencia de la presión no afecte los parámetros de filtración y que la velocidad sea proporcional a la misma.

Hipótesis Estadística:

$$H_0: \mu_{P1} = \mu_{P2}$$

$$H_1: \mu_{P1} \neq \mu_{P2}$$

Materiales y Métodos

Se continuó con la metodología de preparación y decoloración de los experimentos previos, durante la filtración se trabajó con una precapa de 3 mm ó 0.85 kg/m³, dosificación de filtro ayuda de 1.93 kg/m³, la temperatura inicial se mantuvo entre 78-80°C y la temperatura del filtrado entre 60-70°C. Se empleó el *medio 1* determinado en el experimento 8 y una área de filtración de 0.04405 m².

Las pruebas se llevaron a cabo en el filtro piloto (figura 9), variando la presión del sistema, con los siguientes niveles de variación 49 y 117.7 kPa, con tres replicas bajo mismas condiciones de operación. La caracterización del proceso de filtración se realizó, tomando tiempos de recolección para volúmenes establecidos cada 5.0x10⁻⁰⁴ m³ hasta un volumen final de 1.0x10⁻⁰² m³, que más tarde se convirtieron en $\Delta t/\Delta V$ y V_p , y graficados para obtener los parámetros de filtración, como se describe en el procedimiento experimental de filtración (pág 25).

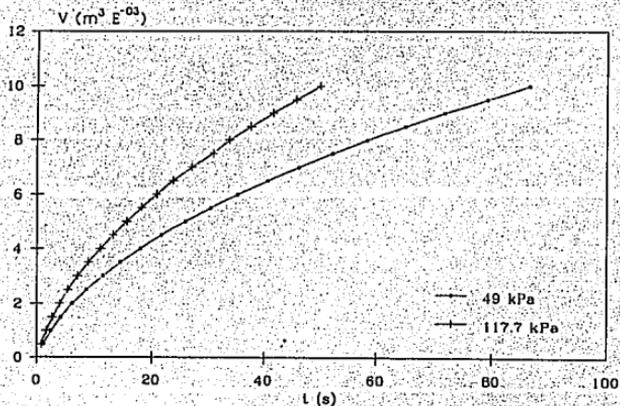
Resultados

Los resultados de velocidad y parámetros de filtración para caídas de presión se presentan en la tabla 12, en la que se puede notar que debido al aumento de la presión de operación, aumenta ligeramente los parámetros de filtración, principalmente la resistencia específica de la torta, donde se registra un sensible aumento, por lo que se puede pensar que la torta de filtración posee cierta compresibilidad.

La gráfica 21 presenta el comportamiento de la velocidad y en la gráfica 22 se observa la tendencia de los parámetros de filtración α y R_m , a las presiones experimentales de operación.

Tabla 12 Velocidad y parámetros de filtración para diferentes caídas de presión a nivel piloto.

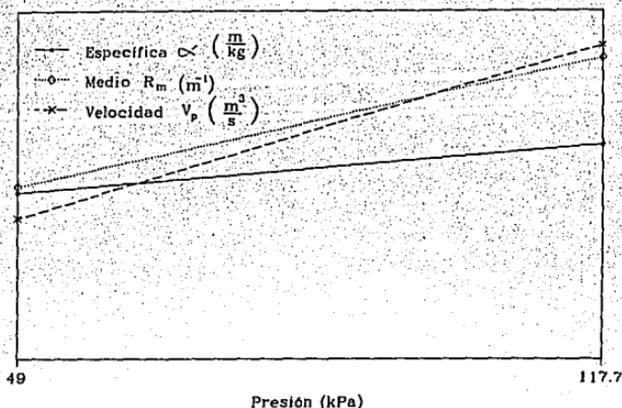
Presión Nº de Repetición	Velocidad Promedio $m^3/s \times 10^4$	α $m/kg \times 10^{-10}$	R_m $m^3 \times 10^{-08}$	Coefficiente de Correlación @ $\Delta v/\Delta V$ vs V_p
49 kPa				
1	1.36	0.56	7.32	0.98
2	1.23	0.62	8.11	0.98
3	1.04	0.83	5.34	0.99
117.7 kPa				
1	1.48	1.39	9.81	0.99
2	1.75	1.01	14.90	0.99
3	1.67	1.18	11.80	0.99



Gráfica 21 Velocidad de filtración a diferentes caídas de presión a nivel piloto.

Análisis de Resultados

Los parámetros de filtración se analizaron con el diseño completamente al azar (ANOVA), los resultados se presentan en el cuadro 24 y cuadro 25. El tratamiento estadístico se comparó a un nivel de significancia de $\alpha=5\%$, con 1, y 4 grados de libertad ; $F=7.71$.



Gráfica 22 Comportamiento de la velocidad y parámetros de filtración a diferentes caídas de presión.

Cuadro 24 ANOVA para la resistencia específica de la torta a diferentes caídas de presión.

Fuente de Variación	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrados Medios	F_c
Tratamientos	1	$5.41 \cdot 10^{18}$	$5.41 \cdot 10^{18}$	0.27
Error	4	$8.06 \cdot 10^{19}$	$2.01 \cdot 10^{19}$	
Total	5	$8.60 \cdot 10^{19}$		

Resistencia Específica de la Torta (α)

$F_c=0.27$ por lo tanto $F > F_c$, la hipótesis H_0 se acepta y H_1 se rechaza, sin embargo en la gráfica 22 se aprecia que la resistencia específica de la torta (α) presenta ligera tendencia a aumentar con la presión, por lo que estos valores de la resistencia específica de la torta (α), fueron graficados en un plano logarítmico ΔP vs α , correspondiente a la ecuación $\alpha = \alpha_0 (\Delta P)^s$, el producto se muestra en la gráfica 23, donde el valor resultante del índice de compresibilidad $s=0.285$, y cae entre 0.1-0.8,

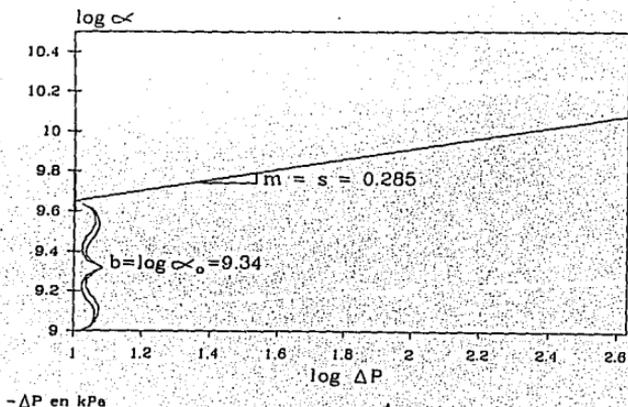
valores para tortas compresibles además de una resistencia específica inicial $\alpha_0=9.34$.

Resistencia del Medio R_m

La $F_c=9.6$, $F_1 < F_c$ se rechaza H_0 y se acepta H_1 , en la gráfica 22 se observa que el valor del R_m sigue una tendencia ascendente con respecto a la presión, por lo tanto es afectada por la presión del sistema, aunque en muchos casos estos valores son despreciables.

Cuadro 25 ANOVA para la resistencia del medio a diferentes caídas de presión.

Fuente de Variación	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrados Medios	F_c
Tratamientos	1	$4.13 \cdot 10^{17}$	$4.13 \cdot 10^{17}$	9.6
Error	4	$1.72 \cdot 10^{17}$	$4.31 \cdot 10^{16}$	
Total	5	$5.85 \cdot 10^{17}$		



Gráfica 23 Determinación gráfica del índice de compresibilidad de la torta.

Se esperaba que la torta de filtración, con la dosificación de filtro ayuda empleada, tendría la rigidez suficiente como para no presentar características de compresibilidad y evitar que los parámetros de filtración fueran influenciados por la presión del sistema, sin embargo esto no fue así, lo anterior resulta muy importante para el escalamiento de la operación, ya que de esta manera, la elección de la presión del sistema determinará el valor de la resistencia específica de la torta y por ende la velocidad del sistema y el ciclo de filtración, ya que una presión demasiado alta, disminuye el volumen del filtrado final, así como el tiempo del ciclo [8,14,15].

Autores como Geankoplis, Johnstone, John's Manville y McCabe [8,14,15,18], mencionan que la mayoría de las tortas de filtración presentan cierta compresibilidad, incluso tortas con estructura a base de diatomita o celite, materiales de estructura rígida a base de calcio, sin embargo cabe mencionar que el origen del carbón activado es celulosa material de estructura compresible, lo que se combina y da por resultado una torta ligeramente compresible, lo cual debe tomarse en cuenta en el diseño de sistemas de filtración.

La determinación de la resistencia específica de la torta (α) para el escalamiento se realizará con la extrapolación de valores de presión comunes empleadas en la industria de alimentos.

II.3.5. Experimento 10: Evaluación del área de filtración en la operación de filtración y clarificación de jarabe.

Objetivo:

Evaluar experimentalmente el comportamiento de los parámetros de filtración (α y R_m) a diferentes áreas de filtración como instrumento de escalamiento.

Variables: °Bx, °T, $-\Delta P$, espesor de precapa, dosificación de filtro ayuda, volumen de suspensión suministrada, medio filtrante, área, velocidad, y parámetros de filtración (α, R_m).

V. Independiente: Área de filtración.

V. Dependientes: Velocidad de filtración, parámetros de filtración (α, R_m) y espesor de la torta.

V. Respuesta: Tiempo y volumen de filtrado recolectado.

V. Controladas: °Bx, °T, $-\Delta P$, espesor de precapa, medio filtrante, dosificación de filtro ayuda, volumen de suspensión suministrada.

Hipótesis: El área de filtración es una variable importante en el diseño de cualquier equipo de filtración, ésta influye directamente en la velocidad de operación y capacidad del sistema; por otro lado al variar el área de filtración manteniendo un volumen de suspensión constante, se alterará el espesor final de la torta con lo que se podría afectar los parámetros de filtración; sin embargo se espera que debido al acomodo de las partículas durante la formación de la torta de filtración, el comportamiento de la resistencia específica sea semejante para cualquier área.

Hipótesis Estadística:

$$H_0: \mu_{A1} = \mu_{A2} = \mu_{A3}$$

$$H_1: \mu_{A1} \neq \mu_{A2}$$

Materiales y Métodos

Se continuaron con los métodos de preparación y decoloración del jarabe de azúcar al igual que en los experimentos anteriores. La filtración se llevó a cabo utilizando el equipo a nivel piloto ilustrado en la figura 9. Se trabajó con precapa de 0.85 kg/m^2 (3 mm), dosificación de 1.93 kg/m^3 , como medio de filtración malla de acero inoxidable 304; calibre 0.12, 80x80 hilos por pulgada, y neopreno como material de empaque, la presión del sistema se mantuvo en 49 kPa, la temperatura inicial entre 78-80°C y la temperatura del filtrado entre 60-68°C.

Las corridas se llevaron a cabo variando el área de filtración, manteniendo constante el volumen de suspensión alimentada, los niveles de variación fueron de 0.04405, 0.0881, 0.1322 m^2 , en pruebas por triplicado bajo iguales condiciones de operación.

Al igual que en los anteriores experimentos, la caracterización del proceso se llevó a cabo, siguiendo el procedimiento experimental de filtración (pág 25).

Resultados

Los resultados de las corridas con diferentes áreas de filtración se presentan en la tabla 13, donde se percibe por un lado, que los valores de la resistencia específica de la torta con diferentes áreas de filtración se mantienen constantes, ver gráfica 25. Por lo que respecta a la resistencia del medio, se aprecia una influencia significativa debido al aumento del área de filtración, disminuyendo sensiblemente la resistencia del medio. En la gráfica 24 se observa el comportamiento de los parámetros de filtración α y R_m , además del un natural aumento de la velocidad de filtración.

Análisis de Resultados

Los parámetros de filtración (α y R_m) se analizaron con el diseño completamente al azar, los resultados de los análisis se presentan en el cuadro 26 y cuadro 27. Los tratamientos estadísticos se compararon a un nivel de significancia de $\alpha_e=5\%$, 2 y 6 grados de libertad; la $F_1=5.14$.

Tabla 13 Velocidad, parámetros de filtración y espesores de la torta para distintas áreas a nivel piloto.

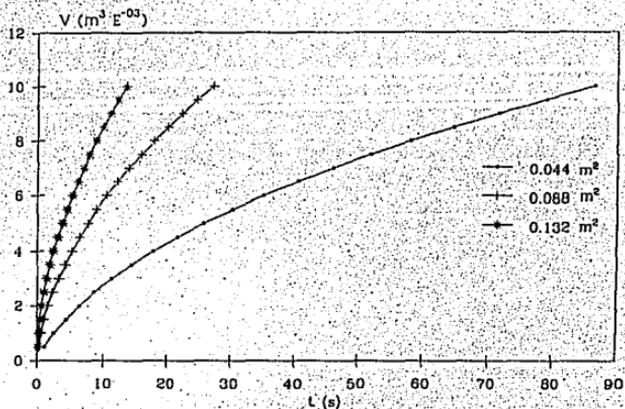
Área (m ²) Espesor (mm) Nº de Repetición	Velocidad Promedio m ³ /sx10 ⁰⁴	α m/kgx10 ⁻¹⁰	R_m m ⁻¹ x10 ⁻⁰⁸	Coefficiente de Correlación @ $\Delta t/\Delta V$ vs V_p
0.0441 (7-8 mm)				
1	1.36	0.56	7.32	0.98
2	1.23	0.62	8.11	0.98
3	1.04	0.83	5.34	0.99
0.0881 (5-6 mm)				
1	4.59	0.70	3.55	0.98
2	3.68	1.01	1.61	0.98
3	3.37	1.11	1.58	0.98
0.1322 (4-5 mm)				
1	5.39	1.60	0.96	0.98
2	6.40	1.35	0.78	0.98
3	19.90	0.42	0.45	0.98

Resistencia Específica de la Torta (α)

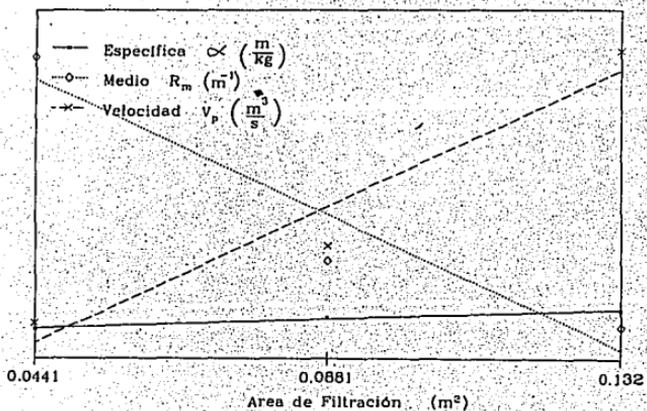
$F_c=1.03$, por lo tanto como $F_i > F_c$, se acepta H_0 y se rechaza H_1 , como se aprecia en la gráfica 25, el valor de la resistencia específica de la torta se mantiene constante con respecto a las diferentes áreas de filtración a pesar de la variación en los espesores de torta, debido al manejo de un volumen de suspensión constante.

Resistencia del Medio

La $F_c=27.8$, $F_i < F_c$, se rechaza H_0 y acepta H_1 , en la gráfica 25 se aprecia que el valor del R_m tiende a disminuir con el aumento del área, la comparación de medias por la prueba de Tuckey, $DMSH=2.7 \times 10^{08}$, y para todas las medias existe diferencia significativa.



Gráfica 24 Velocidad de filtración para diferentes áreas de trabajo.



Gráfica 25 Comportamiento de la velocidad y parámetros de filtración para diferentes áreas.

Cuadro 26 ANOVA para la resistencia específica de la torta con diferentes áreas de filtración.

Fuente de Variación	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrados Medios	F _c
Tratamientos	2	3.12 10 ¹⁹	1.56 10 ¹⁹	1.03
Error	6	9.05 10 ¹⁹	1.51 10 ¹⁹	
Total	8	1.21 10 ²⁰		

Cuadro 27 ANOVA para la resistencia del medio a diferentes áreas de filtración.

Fuente de Variación	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrados Medios	F _c
Tratamientos	2	6.25 10 ¹⁷	3.13 10 ¹⁷	27.8
Error	6	6.75 10 ¹⁶	1.13 10 ¹⁶	
Total	8	6.93 10 ¹⁷		

En general el área de filtración influye directamente en la velocidad, no así en la resistencia específica de la torta a pesar del manejo de diferentes espesores de torta a través del volumen de suspensión, por lo tanto para áreas mayores el comportamiento de esta resistencia deberá conservar el mismo valor, lo cual es muy importante para el escalamiento de la operación. La resistencia del medio disminuye significativamente con el aumento del área de filtración, por lo que para áreas de filtración mayores podría considerarse despreciable, lo cual es habitual en grandes áreas de filtración [8,14,18].

A continuación en la figura 11 se presenta un diagrama de bloques de la operación, donde se resume las mejores condiciones de decoloración y clarificación del jarabe de azúcar estándar.

Elaboración de Jarabe de Azúcar Estándar

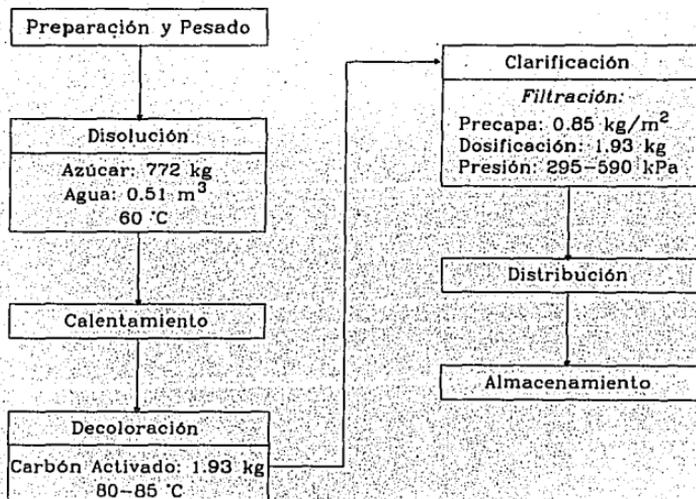


Figura 11 Diagrama de flujo de la operación de elaboración de jarabe de azúcar estándar.

CAPÍTULO III

Escalamiento y Justificación Económica

III.1. Escalamiento

Después de haber determinado las mejores condiciones de decoloración y clarificación para el jarabe de azúcar estándar, el siguiente paso consistió en establecer las bases para el escalamiento de la operación a nivel industrial, para después dar paso a la justificación económica del proyecto.

Como primer paso fue necesario establecer algunas de las bases de cálculo que permitan el escalamiento a nivel industrial, para ello fue necesario investigar los consumos de azúcar en empresas dedicadas a la manufactura de productos derivados de las frutas y hortalizas (p. ej. elaboración de almíbares, bebidas refrescantes, néctares, conservas, jugos, etc.).

Por comunicación personal se estableció que los consumos promedio en estas empresas se ubica entre 30 y 80 toneladas de azúcar por día. En base a esta información se determinó establecer un punto medio de 55 toneladas de azúcar por día.

El paso siguiente consistió en determinar el área de filtración con la que el jarabe, sea filtrado a la velocidad requerida por el sector de manufactura sin que sea alterado por falta de materia prima, para lo siguiente debió ser considerado; a) temporadas de alta demanda y ventas por lo tanto alta producción; b) horarios de trabajo de la empresa y consumo máximo de azúcar en horarios considerados como pico.

Muchas empresas trabajan con tres turnos por día en sus líneas de mayor producción, además de esto emplean turnos mixtos en líneas de menor demanda. Generalmente en estos turnos laboran en un horario de 8:00 a 18:00 hr, por lo tanto se considera que durante este lapso se consume el máximo volumen de jarabe.

Por lo anterior, el consumo puede llegar hasta el 60% del total, además de esto, se consideró la inclusión de un periodo que puede llegar a los 60 minutos para la limpieza del filtro por lo tanto:

- En base a 55 toneladas de azúcar se producen 71.3 m^3 de jarabe a 60°Bx .
- El 60% del consumo diario resulta en 42.8 m^3 .
- Se considera que este consumo se realiza en 9.0 hr.

Por lo anterior el requerimiento mínimo será de 4.75 a 5 m³/hr, por lo tanto se debe tomar en cuenta que la filtración debe realizarse posteriormente a la preparación, por lo tanto, la clarificación debe llevarse a cabo en los últimos 15 minutos de la hora, dando tiempo a la siguiente preparación.

Cálculo del Área de Filtración

Como parte del escalamiento del proceso de filtración, se requiere proyectar las condiciones del proceso a una escala mayor, para lo cual, es necesario efectuar el cálculo del área de filtración considerando los valores encontrados en las etapas experimentales, los cuales sirven de soporte base, considerando que las proporciones de estas variables conservan las condiciones de dinámica y cinemática semejantes a las del trabajo a nivel piloto.

Para el cálculo del área de filtración se requiere analizar la ecuación general de filtración ec (6) el área (pág 24) y despejar de la misma el área de lo cual se obtiene:

$$\frac{1}{A} = \frac{R_m}{V\alpha C_s} \left[1 - \sqrt{1 + \frac{2\alpha(-\Delta P)C_s}{\mu R_m^2}} \right] \quad (8)$$

Sustituyendo los valores para la operación a nivel industrial y empleando los parámetros de filtración encontrados en las etapas preliminares, se obtiene el área de filtración.

Valores de las Variables:

$$t=900 \text{ s}$$

$$V=5 \text{ m}^3$$

$$(-\Delta P)=196,170 \text{ Pa}$$

$$\mu=0.007 \text{ Pa}\cdot\text{s}$$

$$C_s=3.85 \text{ kg/m}^3$$

$$R_m=8.31 \times 10^{04} \text{ m}^{-1}$$

$$\alpha=9.84 \times 10^{09} \text{ m/kg}$$

De la ec (7) (pág 25):

$$\alpha=\alpha_0(-\Delta P)^s$$

$$\text{Para } (-\Delta P)=196,170 \text{ Pa}$$

$$s=0.285; \text{ y } \text{Log } \alpha_0=9.34$$

$$\alpha=9.84 \times 10^{09} \text{ m/kg}$$

El área resultante fue igual a 4.42 m², Johnstone [14], recomienda aplicar un factor de seguridad de 40%, de esta manera el área se incrementa hasta 6.2 m², por lo tanto la selección del filtro para el jarabe se debe realizar en base a esta área como mínimo.

III.2. Justificación Económica

Cualquier inversión que involucre la compra de bienes de capital debe cuantificarse bajo un proceso de decisión, debido a la complejidad y el costo que resultaría una decisión equivocada [5].

Existen tres métodos sencillos para analizar la viabilidad económica de un proyecto de bienes de capital [5,22,23]:

- Período de reembolso.
- Rendimiento sobre inversión.
- Valor presente.

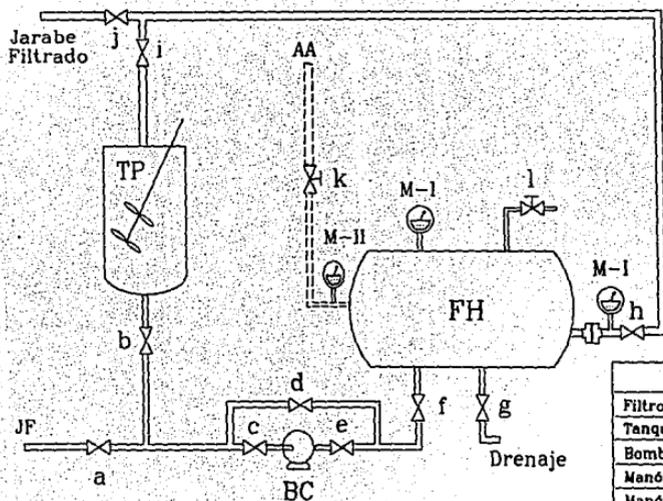
Para efectuar la justificación económica se empleó el método de *Rendimiento sobre la inversión*, ya que permite determinar el valor de la tasa de interés bruta que se genera sobre la inversión inicial, para lo cual es necesario establecer y desglosar los costos que se deriven del arranque y operación de la unidad [5,22]. Sin embargo para un análisis económico más profundo, existen otros métodos financieros que involucran aspectos relativos a impuestos, depreciación, inflación etc.[22], los cuales dependen de datos y cifras que reflejen con precisión la condición financiera de una empresa en particular. Cualquier empresa que requiera de una unidad de decoloración y clarificación de jarabe de azúcar estándar, y que cuente con una área determinada para la elaboración del jarabe; sólo se requeriría la inversión en la compra e instalación de un filtro de presión, los cuales existen en una amplia variedad de tipos modelos y tamaños. En la figura 12 se muestra el diagrama de la sección de filtración propuesta. Adjunto a esto se consideraron los gastos de operación derivados de mano de obra, servicios, mantenimiento y materiales; decolorante y coadyuvante de la filtración, los cuales serían utilizados una sola vez.

Se tomaron en cuenta los beneficios derivados del cambio de edulcorante, azúcar refinada por azúcar estándar.

Como se mencionó anteriormente, la selección del filtro de presión se llevó a cabo en base al área de filtración determinada en la sección de escalamiento, para ello se recurrió a la empresa "Ingeniería Shriever S.A. de C.V." dedicada a la manufactura y venta de equipo industrial enfocada a la filtración.

De sus catálogos se encontró un filtro horizontal de hojas verticales modelo 30-HTVL-100-4, de tanque cilíndrico de 0.762 m (30 pulgadas) de diámetro, construido en acero inoxidable 304, diseñado para 491.75 kPa (5.0 kg/cm²) y hojas verticales y área de filtración de 9.1 m² (100 pies²).

Figura 12 Sección de clarificación de jarabe de azúcar estándar por filtración.



Descripción	Clave
Filtro de Hojas	FH
Tanque de Precapa	TP
Bomba Centrífuga de 4 HP	BC
Manómetro 0-4 kg/cm ²	M-I
Manómetro 0-7 kg/cm ²	M-II
Jarabe a Filtrar	JF
Alimentación de Aire	AA
Válvula de Bola 2"	a-j
Válvula de Aguja 3/4"	k.l
U.N.A.M. FES-CUAUTILAN UNIDAD DE FILTRACION	
FILTRO DE PRESION	
Dib. E.A.L.G.	Rev. L.C.M.F.
Escala: S/E	Fecha: Julio 1994

III.2.1. Costos

Inversión Inicial

Concepto	Valor (miles de NS)
Filtro de presión modelo 30-HVLT-100-4.	456.85
Paila de acero inoxidable de 0.8 m ³ .	32.26
Bomba centrífuga de 8 HP.	26.45
Accesorios: 2 Manómetros de 0-7 kg/cm ² , 10 válvulas de bola de 2 in de diámetro, y de 25 a 30 m de tubería de acero inoxidable de 2 in de diámetro, etc.	18.65
Gastos de instalación y arranque.	12.71
Inversión inicial total:	<u>579.33</u>

Gastos Anuales de Operación

Concepto	Valor (miles de NS)
Mano de obra	49.28
Mantenimiento	43.80
Servicios	15.56
Materiales	
Carbón activado	248.31
Filtro ayuda	109.25
Costos de operación Totales	<u>466.20</u>

Beneficios Anuales

Concepto	Costo Unitario (NS/Ton)	Volumen (Toneladas)	Total (NS)
Azúcar Refinada	2,200	13,970	30,734,000.00
Azúcar Estándar	1,840	13,970	25,704,000.80
Ahorro por diferencia en el precio			5,029,000.20

Balance Global de Costos (en miles de nuevos pesos)

Año	Inversión Inicial	Costo de Operación	Beneficios
0	573.33	---	---
1	---	466.20	5,029.2
2	---	466.20	5,029.2
3	---	466.20	5,029.2
4	---	466.20	5,029.2
5	---	466.20	5,029.2

Como se aprecia en la tabla anterior donde se resumen los costos involucrados en el proyecto. De acuerdo con el método de análisis financiero de *rendimiento sobre la inversión* [5,22,23] la ecuación para obtener la tasa de interés del proyecto será:

$$0 = - \text{Inversión} + \text{Beneficios } (P/A, i\%, n) - \text{Costos } (P/A, i\%, n) \quad (9)$$

Donde:

- $(P/A, i\%, n)$ = Factor de valor presente serie uniforme.
- n = Número de años del proyecto.
- $i\%$ = Rendimiento sobre la inversión encontrada por ensayo y error.

El factor de valor presente serie uniforme se puede encontrar empleando la ec (10)

$$P = A \left[\frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} \right] \quad (10)$$

Sustituyendo valores:

$$0 = -579.33 + 5029.2(P/A, i\%, 5) - 466.2(P/A, i\%, 5) \quad (11)$$

Factorizando:

$$0 = -579.33 + 4563(P/A, i\%, 5) \quad (12)$$

Resolviendo la ecuación por ensayo y error se obtiene una tasa de interés de $i\% = 78.7\%$ anual, por lo tanto se puede considerar el proyecto de sustitución de azúcar refinada por azúcar estándar bastante redituable, para un consumo estimado en 55 toneladas diarias. Sin embargo lo anterior depende únicamente de las condiciones financieras de la empresa, por lo que este análisis solo funciona como un indicador de que el proyecto posee posibilidades económicas.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A través de los experimentos realizados, fue posible establecer las mejores condiciones de operación para la decoloración y clarificación del jarabe de azúcar estándar.

Durante la etapa de decoloración, se obtuvieron licores con un contenido de colorantes menor a los 229 unidades ICUMSA que presentó el jarabe de azúcar refinada, lo cual depende directamente, aunque no en forma proporcional a la concentración de carbón activado. La selección de la concentración de carbón activado se llevó a cabo en base al índice de color del jarabe de azúcar refinada. Con 1.93 kg/m^3 de carbón activado se obtuvo un índice de color de 250 unidades ICUMSA lo cual es muy cercano a este índice deseado.

Por lo que respecta a la temperatura de decoloración, los mejores resultados se obtuvieron en el rango de $80\text{-}85^\circ\text{C}$ por un tiempo de 15 minutos con agitación constante.

La clarificación del jarabe de azúcar estándar se llevó a cabo por filtración a presión, las mayores velocidades se obtuvieron bajo las siguientes condiciones:

Precapa; a base de filtro ayuda, empleando *hy flo-supercel* como coadyuvante de la filtración, a una concentración de 0.85 kg/tm^2 (para un espesor de 3 mm).

Dosificación; bajo estas condiciones de decoloración es indispensable el uso filtro ayuda, se empleó *hy flo-supercel* a una concentración de 1.93 kg/m^3 , donde se logró alcanzar la mayor velocidad experimental de filtración.

Medio de Filtración Material elaborado con malla de acero inoxidable 304 calibre 0.12 y 80x80 hilos por pulgada cuadrada, descrito en la experimentación como *medio 1*, cumple con las características necesarias para un medio filtrante.

Por otra parte, se estableció que la torta de filtración formada bajo las condiciones anteriores, presenta características de compresibilidad, por lo que se determinó los parámetros de compresibilidad con presiones de operación diferentes. El índice de compresibilidad permite, la extrapolación de los parámetros de filtración a presiones mayores considerando que las características de la torta se conservan. Con la ayuda de la ecuación $\alpha = \alpha_0 (-\Delta P)^s$ se determinó el valor de las constantes las cuales son:

$$s=0.285; \text{ y } \text{Log } \alpha_0=9.34$$

Sin embargo se recomienda la continuación del trabajo experimental con presiones mayores para corroborar lo anterior.

En el manejo del área de filtración se determinó que esta variable no influye en el valor de la resistencia específica de la torta, sin embargo la resistencia del medio disminuye con el aumento del área de filtración, haciéndolo despreciable en áreas de filtración mayores.

Por lo que respecta a la justificación económica de la operación, se obtendría un rendimiento anual sobre la inversión de 787%, para un consumo estimado de 55 toneladas diarias. Sin embargo esto únicamente depende de las condiciones financieras en que se encuentre una empresa, por lo que este análisis solo funciona como un indicador de que el proyecto posee posibilidades económicas.

Aproximadamente un 13%, representaría el ahorro para la industria de alimentos debido a la sustitución de azúcar refinada por estándar, en el costo del azúcar como materia prima.

Se recomienda la continuación del trabajo de sustitución en los siguientes aspectos:

Continuar con el estudio financiero del proyecto empleando otros indicadores económicos que reflejen las condiciones particulares de una empresa de alimentos.

Evaluar las condiciones de decoloración trabajando con diferentes tipos de decolorantes iónicos.

Evaluar pérdidas de azúcar que se pudieran presentar durante la clarificación y decoloración del jarabe.

Trabajar con diferentes tipos de filtro ayuda, buscando aumentar la velocidad de filtración y evaluar sobre ciclos de lavado del filtro.

Evaluar la factibilidad de re-utilización del carbón activado y del filtro ayuda.

APÉNDICES

APÉNDICE I: MÉTODOS ANALÍTICOS

Método ICUMSA de Medición de Color³

Análisis: Color

Objetivo: Determinar el Color de Soluciones de Azúcar por Absorbancia.

Equipo: Espectrofotómetro con longitud de onda (420 y 720nm), al vacío.

Reactivos: Agua filtrada o destilada, Kieselgur grado analítico.

Procedimiento: Preparar la solución de azúcar a la cual le será determinado el color. La solución de azúcar se filtra al vacío. El pH de las soluciones oscuras se ajusta 7.0 ± 0.2 utilizando ácido clorhídrico o hidróxido de sodio. Remover el aire de la solución ya sea por vacío o por "baño" sónico. Colocar cuidadosamente la solución en la celda del espectrofotómetro y determinar la Absorbancia de la solución a 420 nm, usando agua filtrada o destilada como estándar de referencia.

Medición del color. Enjuagar la celda de medición con la solución problema y luego se llena. Se determina la absorbancia de la solución a 420 nm, utilizando agua destilada como patrón de referencia para color.cero. Se elige la longitud de la celda de tal manera que la lectura del instrumento se encuentre entre 20 y 80% de transmitancia, excepto en el caso de las soluciones de azúcar blanco, en cuyo caso la longitud de la celda debe ser la mayor posible.

Cálculos: El índice de absorbancia, a_s , de la solución se obtiene como sigue:

$$a_s = \frac{-\log T_s}{bc} = \frac{A_s}{bc}$$

³ Shneider. Citado por James Chen., de la International Commission for Uniform Methods of Sugar Analysis (ICUMSA), 1979.

Donde:

T_t =transmitancia

A_t =absorbancia

b=longitud de la celda

c=concentración de los sólidos totales (g/cm^3) determinada por refractómetro y calculada a partir de la densidad.

Este valor (a_t) multiplicado por 1000 se indica como unidades ICUMSA (U.I.), donde x =longitud de onda utilizada en nm.

Método: USNC MOA 0011

Análisis: pH

Objetivo: Determinar el pH de la solución de azúcar.

Equipo: Medidor Electrométrico de pH con compensador de temperaturas.

Reactivos: Solución Buffer de pH conocido, Agua destilada.

Procedimiento: Preparar la solución de azúcar a la cual le será medido el pH. Mantener constante la temperatura de la solución (20 °C). Comprobar la calibración de los electrodos del medidor de pH con la solución buffer a temperatura ambiente. Enjuagar los electrodos con la solución problema para eliminar los residuos del buffer y sumergirlos en ésta de modo que los bulbos queden completamente cubiertos. Ajustar el compensador de temperatura a la temperatura de la solución, esperar por lo menos 5 minutos y tomar la lectura.

Método: ICUMSA

Análisis: °Bx

Objetivo: Determinar el °Bx de Soluciones de Azúcar.

Equipo: Refractómetro Manual Bausch & Lomb de 58-90 °Bx

Reactivos: Agua destilada.

Procedimiento: Preparar la solución de azúcar a la cual le será determinado los °Bx. Mantener constante la temperatura de la solución (20 °C). Enjuagar el prisma del instrumento con agua destilada y secarlo perfectamente. Cubrir el prisma del instrumento con la solución problema. Leer la escala °Brix en el ocular, de esta forma la lectura es directa.

APÉNDICE II: MÉTODOS ESTADÍSTICOS

Diseño Completamente al Azar Análisis de Varianza (ANOVA)⁴

El modelo estadístico para este diseño es:

$$y_{ij} = \mu + \tau_i + e_{ij} \quad i=1,2,\dots,a; \quad j=1,2,\dots,n$$

donde: μ =media general

τ_i =efecto del i-ésimo tratamiento

e_{ij} =error aleatorio

α_e =nivel de significancia estadística

Las siguientes hipótesis de interés a probar en este diseño son:

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_a$$

H_1 : al menos una $\mu_i \neq \mu_j$

H_0 : Se rechaza Si $F_0 > F_{\alpha, a-1, N-a}$

Análisis de Varianza para un Diseño de Efectos Fijos Unifactorial

Fuente de Variación	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Media de Cuadrados	F_0
Tratamientos	SS_{Trat}	$a-1$	$MS_{Trat} = \frac{SS_{Trat}}{a-1}$	$F_0 = \frac{MS_{Trat}}{MS_E}$
Error	SS_E	$N-a$	$MS_E = \frac{SS_E}{N-a}$	
Total	SS_T	$N-1$		

⁴ Douglas C. Montgomery. "Diseño y Análisis de Experimentos". ed. Grupo Editorial Iberoamérica

Las sumas de los cuadrados se obtienen de las siguientes ecuaciones:

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n y_{ij}^2 - \frac{y_{..}^2}{N}$$

$$SS_{Trat.} = \sum_{i=1}^a \frac{y_{i.}^2}{n} - \frac{y_{..}^2}{N}$$

$$SS_E = SS_T - SS_{Tratamientos}$$

Pruebas a Posteriori

Prueba de Tukey (Diferencia Mínima Significativa Honesta)⁵

Es una prueba de comparación de medias bastante estricta y mantiene la probabilidad de que cualquier diferencia de medias haya sido declarada falsamente significativa, en el nivel α_E fijado.

Procedimiento

Calcular el valor de DMSH a partir de:

$$DMSH = q_{\alpha_E, t, g.l.} S_{\bar{x}}$$

Donde:

$q_{\alpha_E, t, g.l.}$ = Factor obtenido de las tablas de rango estudentizado con un nivel de significancia dado, t tratamientos y g.l. los grados de libertad del error.

$$S_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{s^2}{r}} = \sqrt{\frac{CMER}{r}} \quad = \text{Desviación Estándar de la media.}$$

Cualquier diferencia entre dos medias se declara estadísticamente significativa si excede el valor de la DMSH.

⁵ Hurley Phee, Dennis., *Técnicas de Diseño Experimental*. Facultad de Estudios Superiores Cuautitlan UNAM.

BIBLIOGRAFÍA

- 1).- Baikov, V.E., *Manufacture and Refining of Raw Cane Sugar*. ed. Elsevier.
- 2).- Cámara Nacional de las Industrias Azucarera y Alcoholera., *Manual Azucarero Mexicano*, 1991-1992.
- 3).- Castañeda, Francisco J., *Tensoactivos Catiónicos su Obtención y Aplicaciones en la Industria*, Tesis para obtener el título de Ingeniero Químico, FES-C. UNAM. 1986.
- 4).- Chen, James P., *Cane Sugar Handbook*. ed. John Wiley & Son, Inc.
- 5).- Coss, Raúl Bu., *Análisis y Evaluación de Proyectos de Inversión*. ed. Limusa.
- 6).- Douglas C. Montgomery., *Diseño y Análisis de Experimentos*. ed. Grupo Editorial Iberoamericana.
- 7).- Fenemma, Owen R., *Introducción a la Ciencia de los Alimentos*. ed Reverte España.
- 8).- Geankoplis, Christie J., *Procesos de Transporte y Operaciones Unitarias*. ed. C.E.C.S.A.
- 9).- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI)., *Estadísticas de la Industria Azucarera*. Subdirección de Planeación y Desarrollo, 1985 a 1993.
- 10).- Hajer, Victor G., *Management of Engineering Projects*. ed. McGraw-Hill.
- 11).- Himmelblau, D., *Optimization of Chemical Processes*. ed. McGraw-Hill.
- 12).- Hugot, E., *Handbook of Cane Sugar Engineering*. ed. Elsevier.
- 13).- Hurley Phee, Dennis., *Técnicas de Diseño Experimental*. Facultad de Estudios Superiores Cuautitlan UNAM.
- 14).- Johnstone, E., *Pilots Plants, Models, and Scaling Up Methods*. ed. McGraw-Hill.
- 15).- John's Manville., *Celite Filtro Ayudas*® Folleto de Consulta.
- 16).- López G., Antonio., *Diseño de Industrias Agroalimentarias*. ed. A. Madrid V.
- 17).- Mead, R., *The Design of Experiments*. ed. Cambridge.

- 18).- McCabe, Warren L., *Unit Operations of Chemical Engineering*. ed McGraw-Hill.
- 19).- Orr, Clyde, *Filtration Principles and Practices; Part I*. ed. Marcel Dekker.
- 20).- Pennigton, Neil L., *Sugar*. ed. A.V.I. Publish.
- 21).- Polifos S.A.de C.V., *Carbón Activado Actibón®*, Folleto de Consulta.
- 22).- Tarquin, J.Anthony, *Ingeniería Económica*. ed. McGraw-Hill.
- 23).- Thuesen, H.G. *Ingeniería Económica*. ed. Prentice-Hall Inc.
- 24).- Treybal, Robert E., *Operaciones de Transferencia de Masa*. ed. McGraw-Hill.
- 25).- Sánchez, Juan D., *El Azúcar, con el Amargo Sabor de la Crisis*. Época N° 115
México D.F., 16 de Agosto de 1993.

ÍNDICE DE MATERIAS

ÍNDICE DE FIGURAS

		<u>Página</u>
Figura 1	Principales productores de azúcar en el mundo.	3
Figura 2	Estructura química de la molécula de sucrosa.	10
Figura 3	Diagrama simplificado para la obtención de azúcar crudo.	14
Figura 4	Diagrama de bloques del proceso de refinación del azúcar.	16
Figura 5	Metodología general de la experimentación.	29
Figura 6	Metodología general de la experimentación (continuación).	30
Figura 7	Sistema de filtración al vacío; nivel laboratorio.	32
Figura 8	Parrilla con agitación magnética.	37
Figura 9	Sistema para pruebas de filtración a presión constante.	46
Figura 10	Equipo piloto para pruebas de filtración a presión; filtro prensa.	60
Figura 11	Diagrama de flujo de la operación de elaboración de jarabe de azúcar estándar.	92
Figura 12	Sección de clarificación de jarabe de azúcar estándar por filtración.	98

ÍNDICE DE TABLAS

		<u>Página</u>
Tabla 1	Precios oficiales de venta en México a través del P.E.C.E.	6
Tabla 2	Consumo de azúcar en México y por tipo.	8
Tabla 3	Parámetros de calidad para azúcar refinado y estándar.	12
Tabla 4	Índices de color ICUMSA para jarabes elaborados con azúcar refinada y azúcar estándar filtrado y sin filtrar.	34

PAGINACION VARIA

COMPLETA LA INFORMACION

Tabla 5	Índices de color para diferentes concentraciones de carbón activado.	38
Tabla 6	Índices de color a diferentes rangos de temperatura.	43
Tabla 7	Velocidad y parámetros de filtración para el jarabe de azúcar con diferentes dosificaciones de filtro ayuda.	49
Tabla 8	Velocidad y parámetros de filtración con diferente medio filtrante.	55
Tabla 9	Valores de velocidad y parámetros de filtración a diferentes espesores de precapa a nivel piloto.	63
Tabla 10	Velocidad y parámetros de filtración para diferentes dosificaciones a nivel piloto.	70
Tabla 11	Resultados de velocidad y parámetros de filtración para diferentes medios filtrantes a nivel piloto.	77
Tabla 12	Velocidad y parámetros de filtración para diferentes caídas de presión a nivel piloto.	83
Tabla 13	Velocidad, parámetros de filtración y espesores de la torta para distintas áreas a nivel piloto.	89

ÍNDICE DE GRÁFICAS

		<u>Página</u>
Gráfica 1	Consumo de edulcorantes en Estados Unidos.	4
Gráfica 2	Producción y comercialización de azúcar en México.	5
Gráfica 3	Determinación Gráfica de las constantes de filtración para un proceso a presión constante.	26
Gráfica 4	Índices de color para los diferentes tipos de azúcar.	34

Gráfica 5	Curva de decoloración de jarabe de azúcar estándar para diferentes concentraciones de carbón activado.	39
Gráfica 6	Influencia de la temperatura en la operación de decoloración.	43
Gráfica 7	Efecto de la dosificación en la velocidad de filtración.	50
Gráfica 8	Efecto de la dosificación de filtro ayuda en el inverso de la velocidad vs volumen promedio; nivel laboratorio.	50
Gráfica 9	Efecto de la dosificación en la velocidad y en los parámetros de filtración.	51
Gráfica 10	Efecto del medio filtrante en la velocidad de filtración.	56
Gráfica 11	Efecto del medio filtrante en las constantes de filtración α y R_m	56
Gráfica 12	Influencia del espesor de precapa en la velocidad de filtración.	64
Gráfica 13	Efecto del espesor de precapa en la curva del inverso de la velocidad vs volumen promedio.	64
Gráfica 14	Variación de los parámetros y velocidad de filtración con el espesor de precapa.	65
Gráfica 15	Influencia de la dosificación de filtro ayuda en la velocidad de filtración.	71
Gráfica 16	Efecto de la dosificación en la curva del inverso de la velocidad vs volumen promedio.	71
Gráfica 17	Efecto de la dosificación en el comportamiento de la velocidad y los parámetros de filtración (α y R_m).	72
Gráfica 18	Curva de velocidad de filtración para diferentes medios filtrantes.	78
Gráfica 19	Curva del inverso de la velocidad vs volumen promedio para diferentes medios filtrantes.	78
Gráfica 20	Velocidad y parámetros de filtración para diferentes medios filtrantes.	79
Gráfica 21	Velocidad de filtración a diferentes caídas de presión a nivel piloto.	83
Gráfica 22	Comportamiento de la velocidad y parámetros de filtración a diferentes	

	caídas de presión.	84
Gráfica 23	Determinación Gráfica del índice de compresibilidad	85
Gráfica 24	Velocidad de filtración para diferentes áreas de trabajo.	90
Gráfica 25	Comportamiento de la velocidad y parámetros de filtración para diferentes áreas.	90

ÍNDICE DE CUADROS

		<u>Página</u>
Cuadro 1	Consumo <i>per cápita</i> de azúcar en algunos países (kg/año).	2
Cuadro 2	Usos del azúcar.	7
Cuadro 3	Carbohidratos alimenticios usuales.	9
Cuadro 4	Especificaciones para el carbón activado pulverizado.	21
Cuadro 5	Determinaciones para la caracterización de los jarabes.	33
Cuadro 6	ANOVA para los índices de color de los diferentes jarabes.	35
Cuadro 7	ANOVA para los índices de color a diferentes concentraciones de carbón activado.	39
Cuadro 8	ANOVA para índices de color a diferentes rangos de temperatura.	44
Cuadro 9	ANOVA para la velocidad de filtración y diferentes dosificaciones de filtro ayuda en celda de presión.	52
Cuadro 10	ANOVA para la resistencia específica de la torta (α) a diferentes dosificaciones.	52
Cuadro 11	ANOVA para la resistencia del medio a diferentes dosificaciones.	53
Cuadro 12	ANOVA para la velocidad de filtración con medios de filtración diferentes.	57
Cuadro 13	ANOVA para la resistencia específica de la torta con diferentes medios	

	filtrantes.	58
Cuadro 14	ANOVA para la resistencia del medio (R_m) con diferentes medios filtrantes.	58
Cuadro 15	ANOVA para la velocidad de filtración a diferentes espesores de precapa. . .	65
Cuadro 16	ANOVA para la resistencia específica de la torta (α) a diferentes espesores de precapa.	66
Cuadro 17	ANOVA para las resistencias del medio a diferentes espesores de precapa. . .	66
Cuadro 18	ANOVA para la velocidad de filtración para diferentes dosificaciones de filtro ayuda.	73
Cuadro 19	ANOVA para la resistencia específica de la torta (α) para diferentes dosificaciones de filtro ayuda.	73
Cuadro 20	ANOVA para la resistencia del medio para diferentes dosificaciones de filtro ayuda.	73
Cuadro 21	ANOVA para la velocidad de filtración con diferentes medios filtrantes. . . .	79
Cuadro 22	ANOVA para la resistencia específica de la torta para diferentes medios filtrantes.	80
Cuadro 23	ANOVA para la resistencia del medio para diferentes medios filtrantes. . . .	80
Cuadro 24	ANOVA para la resistencia específica de la torta a diferentes caídas de presión.	84
Cuadro 25	ANOVA para la resistencia del medio a diferentes caídas de presión.	85
Cuadro 26	ANOVA para la resistencia específica de la torta con diferentes áreas de filtración.	91
Cuadro 27	ANOVA para la resistencia del medio a diferentes áreas de filtración.	91