

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

ESTUDIO DE LA DOSIFICACIÓN DE FLOCULANTE EN  
UN CLARIFICADOR RAPI-DORR 444

TESIS

PRESENTADA A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

FERNANDO ANTONIO TOCK AMEZQUITA  
AL CONFERIRSELE EL TÍTULO DE  
INGENIERO QUÍMICO

GUATEMALA, JULIO DE 1999.

**HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

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

**Estudio de la dosificación de floculante en un clarificador Rapi-Dorr 444**, tema que fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química con fecha 14 de mayo de 1999.



Fernando Antonio Tock Amézquita

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

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

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN

GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Herbert René Miranda Barrios
EXAMINADOR	Ing. César García Guerra
EXAMINADOR	Ing. Williams Álvarez Mejía
EXAMINADOR	Ing. Manuel Galván Estrada
SECRETARIA	Inga. Gilda Marina Castellanos de Illescas

## **AGRADECIMIENTOS**

Al Dr. Rodolfo Espinosa Smith, por su gran apoyo tanto en el campo académico y profesional.

Al Ing. Jaime Klussmann, por su apoyo y asesoría en el presente trabajo de tesis.

A todas aquellas personas que de un modo u otro hicieron posible la culminación de esta etapa de mi carrera.

## DEDICATORIA

A Dios

A mis padres:

prof. Manuel Antonio Tock González

profa. Flora Amézquita de Tock

A mi hermano:

Edwin Manolo Tock Amézquita

Guatemala, 3 de junio de 1,999.

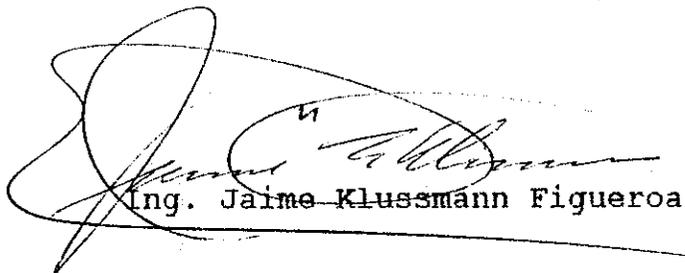
Ingeniero  
Otto Raúl de León de Paz  
Director de Escuela Ingeniería Química  
Facultad de Ingeniería  
Presente.

Estimado Ingeniero de León.

Por medio de la presente me dirijo a usted para hacer de su conocimiento que he revisado como asesor el Informe Final de Tesis del estudiante **Fernando Antonio Tock Amézquita**, titulado: **Estudio de la dosificación de floculante en un clarificador Rapi-Dorr 444**, dejo constancia de aprobación para la autorización del respectivo trabajo.

Sin otro particular y agradeciéndole la atención que se sirva dar a la presente, le saluda.

Atentamente,



Ing. Jaime Klusmann Figueroa





FACULTAD DE INGENIERIA

El Director de la Escuela de Ingeniería Química; Ingeniero Otto Raúl de León de Paz, después de conocer el dictamen del asesor con el Visto Bueno del Jefe de Departamento, al trabajo de Tesis del estudiante **Fernando Antonio Tock Amezcuita**, titulado: **ESTUDIO DE LA DOSIFICACION DE FLOCULANTE EN UN CLARIFICADOR RAPI-DORR 444.**

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

Guatemala, 20 de julio de 1,999.



FACULTAD DE INGENIERIA

El Decano de la Facultad de Ingeniería, luego de conocer la autorización por parte del director de la Escuela de Ingeniería Química, al trabajo de Tesis titulado: ESTUDIO DE LA DOSIFICACION DE FLOCULANTE EN UN CLARIFICADOR RAPI-DORR 444, del estudiante Fernando Antonio Tock Amézquita, procede a la autorización para la impresión de la misma.

IMPRIMASE:

  
Ing. Herbert René Miranda Barrios  
DECANO



Guatemala, agosto de 1999

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	II
LISTA DE SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS	III
GLOSARIO	IV
RESUMEN	VII
INTRODUCCIÓN	IX
1. MARCO TEÓRICO	1
1.1 Decantación	1
1.2 Descripción de un clarificador	2
1.3 Sistema de clarificación con "Flash Tank"	5
1.4 Características de una buena clarificación	6
1.5 Polímeros floculadores	7
1.6 Dosificación y preparación del floculante	10
2. RESULTADOS	13
3. EXPLICACIÓN DEL MÉTODO EXPERIMENTAL Y DISCUSIÓN	
DE RESULTADOS	16
CONCLUSIONES	23
RECOMENDACIONES	24
REFERENCIAS	25

## INDICE DE ILUSTRACIONES

	<b>FIGURAS</b>	<u>PÁGINA</u>
1	Clarificador Rapi-Dorr 444	4
2	Coagulación y floculación	9
3	Forma de preparación del floculante	12
4	Gráfica de Tiempo de Sedimentación	13
5	Gráfica de Absorbancia a 420 nm	14
6	Gráfica de Turbidez a 560 nm.	15

## TABLAS

I	Tiempo de Sedimentación	13
II	Absorbancia a 420 nm	14
III	Turbidez a 560 nm.	15

## LISTA DE SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS

Dp	Diámetro de partícula en metros (pies)
dp	Densidad de la partícula en Kg/m <sup>3</sup> (lb/pie <sup>3</sup> )
dl	Densidad del líquido en Kg/m <sup>3</sup> (lb/pie <sup>3</sup> )
°C	Grados Celsius
°F	Grados Fahrenheit
m	metros
mu	viscosidad del líquido en Pa.s ( lb/(pie.s))
nm	nanómetros = 10 <sup>-9</sup> metros
N	Newton
Pa	Pascal (N/m <sup>2</sup> )
ppm	partes por millón
rpm	Revoluciones por minuto
v	Velocidad de sedimentación en m/s (pies por segundo)

## GLOSARIO

### **Cachaza**

Sedimento producido durante la clarificación del jugo de caña, contiene las impurezas no deseadas en el jugo para la producción de azúcar, esta pasa a un proceso de filtración para luego ser usada como fertilizante. Otros nombres: cachazas, asientos etc.

### **Clarificador**

Los clarificadores son decantadores continuos; un clarificador es un tanque al que se hace llegar de manera regular y continua el jugo para decantar y que es lo suficientemente grande para que la velocidad de escurrimiento y de circulación del jugo sea un valor tan bajo que no impida que la decantación se realice.

**Decantadores**

son simples tanques rectangulares en los cuales se deja reposar el jugo un tiempo  $t$  necesario a la decantación. Este tiempo  $t$  varía mucho de acuerdo con el tratamiento y sobre todo de acuerdo con el jugo tratado.

**Defecador**

Tanque de doble fondo calentado con vapor directo en el que la temperatura sube a  $97^{\circ}\text{C}$ . En ese momento comienza a formarse espuma que contiene bagazo, el resto del material se asienta lentamente.

**Flasheo**

Es una evaporación instantánea en la cual el vapor total extraído se acerca al equilibrio con el líquido residual.

**Floculación**

Formación de conglomerados formados por partículas finas suspendidas en el líquido y coloides.

## pH

Escala que define que tan ácida o básica es una sustancia, se define como el logaritmo de uno sobre la concentración de protones disociados; el pH del agua es 7 a 25°C y se considera neutro, pH menor que 7 es ácido y mayor que 7 y menor que 14 se considera básico.

## RESUMEN

Una de las partes más importantes en el proceso de fabricación de azúcar es la clarificación del jugo de caña; en este proceso es necesario agregar sustancias floculantes que hacen la clarificación más eficiente y producen mejor floculación.

En el presente trabajo se estudia la dosificación de floculante a agregar, dado el costo que representa tanto consumir floculante en exceso como no agregar lo suficiente.

Se realizaron tres experimentos; en el primero, se midió el tiempo de sedimentación para diferentes cantidades de floculante agregado al jugo de caña. Además se hizo una prueba de sedimentación sin utilizar cal y sin estabilizar el pH entre 6 y 7.

En el segundo y tercer experimento se analizaron muestras de jugo con diferentes cantidades de floculante, midiéndosele absorbancias a 420 y 560 nm por medio de un espectrofotómetro, encontrando con ello diferentes turbiedades.

Todas las muestras analizadas se mantuvieron en un promedio de Temperatura de 101°C (214°F) y un pH de 7, ya

que al no mantener estos parámetros en un rango cercano los resultados no serían confiables.

Aunque en la hipótesis se sugirió un rango de dosificación de floculante de 3 a 6 ppm , para el presente caso se encontró que el rango óptimo es de 5 a 8 ppm de floculante, usando para dicho estudio Separan AP30 cuyo componente químico es poliacrilamida.

## INTRODUCCIÓN

A través de la historia, Guatemala se ha caracterizado por ser un país agroindustrial, teniendo entre sus principales productos de exportación el azúcar.

Para la obtención del azúcar a partir de la caña de azúcar el proceso empieza con el corte de la caña, la cual pasa a un proceso de lavado y preparación , para que en los molinos le sea extraído el jugo .

El jugo extraído en los molinos, pasa a un proceso de clarificación, el cual consiste en sulfitar el jugo para obtener una menor coloración, alcalizar y calentar, todo esto con el fin de que el jugo llegue a los clarificadores a una temperatura y pH deseados y así poder sedimentar los lodos y sustancias no deseables que lleva el jugo, los cuales reciben el nombre de cachaza, cachazas o asientos y que luego es usada como fertilizante.

Luego el jugo pasa a los evaporadores, y, ya concentrado a aproximadamente 55 a 60% de sólidos pasa a un proceso de cristalización a los tachos hasta separar el azúcar de la miel en máquinas centrífugas de alta velocidad (desde 900 hasta 1800 rpm).

De las partes del proceso, una de las más importantes es la clarificación, máxime cuando se desea producir azúcar blanco de buena calidad o azúcar refinado; ya que de esta etapa depende la pureza, el color del azúcar obtenido, así como la forma del grano y el agotamiento que se obtiene de las mieles en la cristalización.

Al clarificador son dosificadas sustancias floculantes, las cuales ayudan a que las impurezas del jugo se aglomeren y sedimenten más fácilmente. Sin embargo no se tiene un estudio experimental a nivel industrial que proponga la cantidad de floculante que se debe agregar; por tal motivo se hace el estudio de la dosificación de floculante a agregar, dado el costo que representa tanto consumir floculante en exceso como no agregar lo suficiente.

El presente estudio tiene como objetivos generales:

- Ilustrar el estudio del uso de materiales a nivel industrial buscando con ello la optimización de recursos.
- Dar a conocer el funcionamiento de un clarificador de jugo de caña de azúcar como ejemplo de un sedimentador.

Y tiene como objetivo específico:

- Obtener un rango de dosificación de floculante (en ppm), que se le debe agregar al jugo de caña tomando como parámetros la absorbancia del jugo de entrada y salida del clarificador y la turbidez del mismo, en un rango de pH entre 6 y 7 y un rango de temperatura entre 93 y 105°C (200 y 220°F), así como la velocidad de sedimentación.

## 1. MARCO TEÓRICO

### 1.1 Decantación

Una vez que el jugo de caña ha pasado por un tratamiento de sulfitación o carbonatación, es necesario dejarlo decantar para separar el jugo claro del precipitado que se formó en su masa.

La decantación se hace de tres maneras: a) en defecadores, b) en decantadores discontinuos, y c) en decantadores continuos o clarificadores.

En los defecadores el calentamiento se obtiene por medio de un doble fondo o de un serpentín calentado por vapor directo reducido a 3 Kg/cm<sup>2</sup>.

Los decantadores son simples tanques rectangulares en los cuales se deja reposar el jugo un tiempo  $t$  necesario a la decantación. Este tiempo  $t$  varía mucho de acuerdo con el tratamiento y sobre todo de acuerdo con el jugo tratado.

Los clarificadores son decantadores continuos; un clarificador es un tanque al que se hace llegar de manera regular y continua el jugo para decantar y que es lo suficientemente grande para que la velocidad de escurrimiento y de circulación del jugo sea un valor tan bajo que no impida que la decantación se realice. El jugo

claro obtenido sale por la parte superior del clarificador de manera regular y continua, tal como lo hacen las cachazas por la parte inferior.

## **1.2 Descripción de un clarificador**

Los clarificadores están divididos generalmente en varios compartimientos que multiplican la superficie de decantación .

Los diversos clarificadores son análogos en sus principios de operación y no varían más que en detalles; por esta razón se describirá solamente el clarificador Dorr , que es el más conocido.

El clarificador tiene un eje central que gira muy lentamente (12 Rev/h) y que lleva láminas raspadoras que barren lentamente con el fondo de los compartimientos.

El jugo por decantarse llega tangencialmente a la parte superior de un compartimiento llamado de "Floculación". En este lugar sobrenada un poco de espuma la que se elimina por medio de un raspador especial que la empuja hacia un pequeño canal lateral de evacuación.

Los compartimientos se comunican entre sí. En cada uno, la cachaza que se deposita, se empuja lentamente hacia el centro en donde cae, por un orificio anular, al fondo del aparato descendiendo a lo largo y al exterior del tubo central.

El tubo central comunica a las partes superiores de los diversos compartimientos. El jugo por decantar pasa del tubo central a los compartimientos por medio de ductos que atraviesan el espacio anular por el que descienden las cachazas.

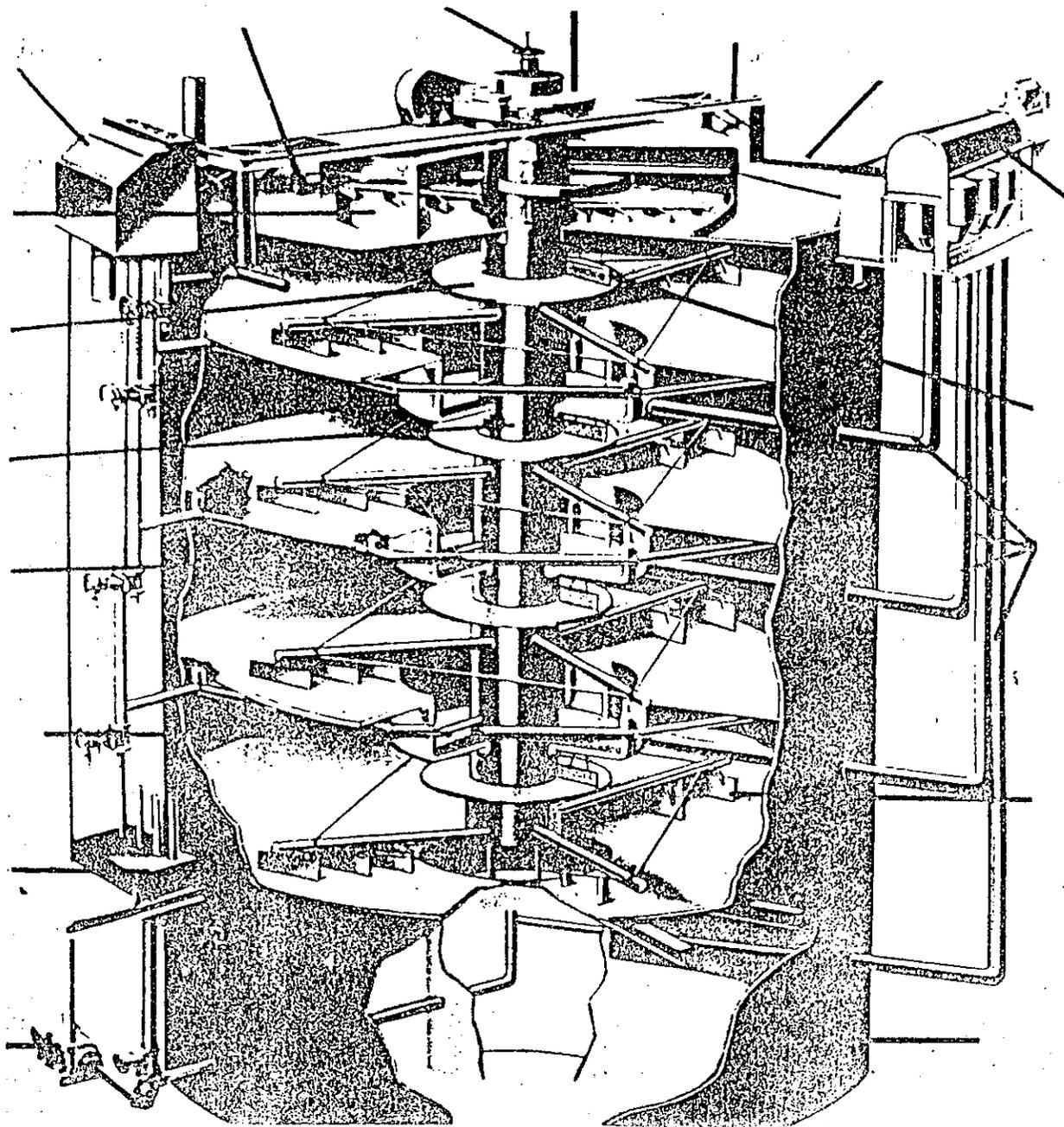
El jugo claro decantado sale de cada compartimiento por varios tubos conectados con la zona más tranquila y más clara de él, es decir, con la circunferencia situada en la parte superior de cada compartimiento, cerca de la parte exterior del clarificador. Estos tubos descargan en una "caja de jugo" en la que el gasto se ajusta con la ayuda de un tubo que corre sobre la extremidad de la tubería, fijando el nivel de derrame, que es evidentemente, con diferencia de pocos milímetros, el nivel del jugo dentro del tanque.

Las cachazas se toman de la parte inferior; podrían, como el jugo salir por gravedad. Generalmente se prefiere, por ser muy espesas, sacarlas por medio de una bomba de diafragma, de válvulas y membranas, de carrera muy pequeña y ajustable, que las hace subir a una "caja de cachazas", cercana a la "caja de jugo", de donde pasan a la filtración.

El clarificador es cerrado, con un visor sobre el compartimiento de floculación. Debe aislarse completamente.

FIGURA 1  
CLARIFICADOR RAPI-DORR 444  
(fuente: Chen, J. (2) pág.192)

Clarificador Rapidorr 444  
(Dorr - Oliver)



### 1.3 Sistema de clarificación con tanque de flasheo (flash tank)

Un sistema común utilizado con un clarificador continuo es el que utiliza un tanque de flasheo o flash tank.

El jugo previamente alcalizado hasta un pH de 7.2 y calentado a una temperatura de 105 °C es trasladado a un tanque en donde se elimina un flujo de vapor, luego a una temperatura de aproximadamente 98°C el jugo es llevado al clarificador para obtener jugo clarificado y cachaza. Previo a entrar en el clarificador, compuestos polielectrolitos son añadidos al jugo con el fin de ayudar a la sedimentación.(1)

#### 1.4 Características de una buena clarificación

Honig (6) presenta los resultados deseados y las causas de los resultados adversos:

Desde un punto de vista práctico son deseables los siguientes resultados:

1. Precipitación y coagulación tan completas como sea posible.
2. Rápida velocidad de asentamiento.
3. Mínimo volumen de asientos.
4. Asientos densos.
5. Jugo claro.

Tanto la temperatura como el pH, la cantidad de cal y la mecánica del proceso determinan el carácter físico del sistema sólido-líquido resultante.

En los resultados adversos de la clarificación están implicados los factores siguientes: (De acuerdo con el esquema inédito de Kortschak):

(1) Un asentamiento incompleto puede ser debido:

- la densidad de algunas al tamaño pequeño de las partículas.
- a la acción coloidal protectora.
- a partículas no mayor que la del jugo.

(2) Un asentamiento lento puede ser debido a:

- la viscosidad del líquido.
- la gran área superficial de las partículas.
- la pequeña diferencia de densidad entre partículas y líquido.

(3) Un gran volumen de asientos puede deberse a:

- la gran cantidad de material precipitante, particularmente fosfatos.

(4) La baja densidad de los asientos puede deberse a:

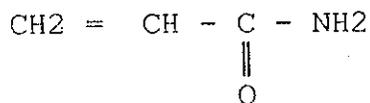
- la forma y tamaño de las partículas.
- la hidratación de las partículas.

### **1.5 Polímeros floculadores**

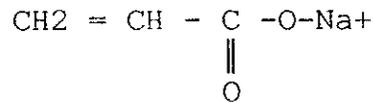
Varios polímeros sintéticos solubles en agua con diversos nombres comerciales se han incorporado al uso general en los ingenios. La acción de estos polielectrólitos es la de producir la floculación secundaria. Por lo general, un buen floculador mejora la floculación, aumenta la velocidad de decantación, reduce el volumen de cachaza, disminuye la Pol en la torta, y lo que es más importante, aumenta la transparencia del jugo clarificado. (2)

Los factores que afectan el funcionamiento de los polímeros en la clarificación del jugo son: tiempo de agitación de la solución madre, concentración iónica del solvente, concentración del polímero en la solución y pH de la solución, influencia del precipitado de P205 y concentración de calcio en el jugo claro.(13)

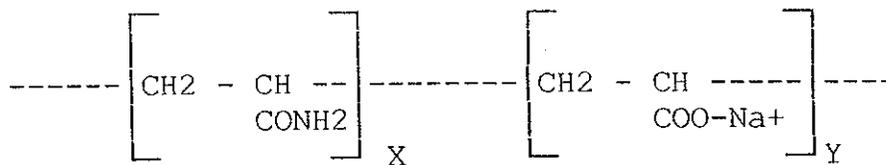
Los agentes de floculación que han dado mejores resultados en la industria del azúcar son las poliacrilamidas parcialmente hidrolizadas.



Acrilamida



Acrilato de Sodio

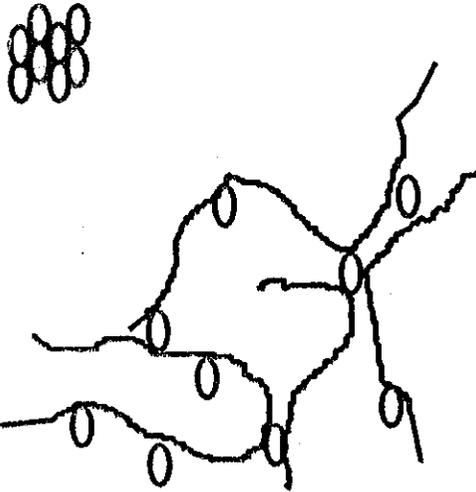


Cadena de poliacrilamida

Ruehrwein y Ward (14) proponen la teoría de la formación de puentes para explicar la floculación y la Mer (9) sugiere que las moléculas de la cadena forman puentes entre las partículas y las enlazan. Whayman y Crees (8)

muestran la diferencia entre los fenómenos de coagulación y la floculación (figura 2)

FIGURA No. 2  
a) coagulación



b) floculación

Los polímeros hasta ahora adoptados en la industria azucarera son principalmente aniónicos, mismos que llevan la misma carga que las partículas en suspensión del jugo.

La dosificación normal de los polímeros para efectuar la clarificación es de 2 a 4 ppm con respecto al peso del jugo. El polímero se prepara primero como una solución madre con una concentración de 0.5 a 0.1%. (2)

No existe un polímero universal que se ajuste a las diversas condiciones, pero en el caso de un ingenio en

particular, es posible que haya un polímero que presente un funcionamiento consistente. (3)

Chen y Colaboradores (15) demostraron que la efectividad de un floculante no se basa sólo en la velocidad de sedimentación, sino más bien en la claridad o transparencia del jugo clarificado. La claridad se determina leyendo la absorbancia del jugo, a 560 nm, antes (A1) y después (A2) de la filtración, y expresando A1 y A2 como la turbiedad del jugo. Mientras más bajo sea este valor, mejor será la claridad.

A causa de las diferencias en el peso y la estructura moleculares de los polímeros, además de las variaciones en las condiciones locales y las variedades de cañas, las características de sedimentación de un polímero varían, dependiendo de la influencia de las variables. (2)

Por lo general, la dosificación óptima se halla en el intervalo de 2 a 4 ppm. El exceso de la dosificación puede tener un efecto adverso (2). (Disminución de la velocidad de sedimentación)

### **1.6 Dosificación y preparación del floculante**

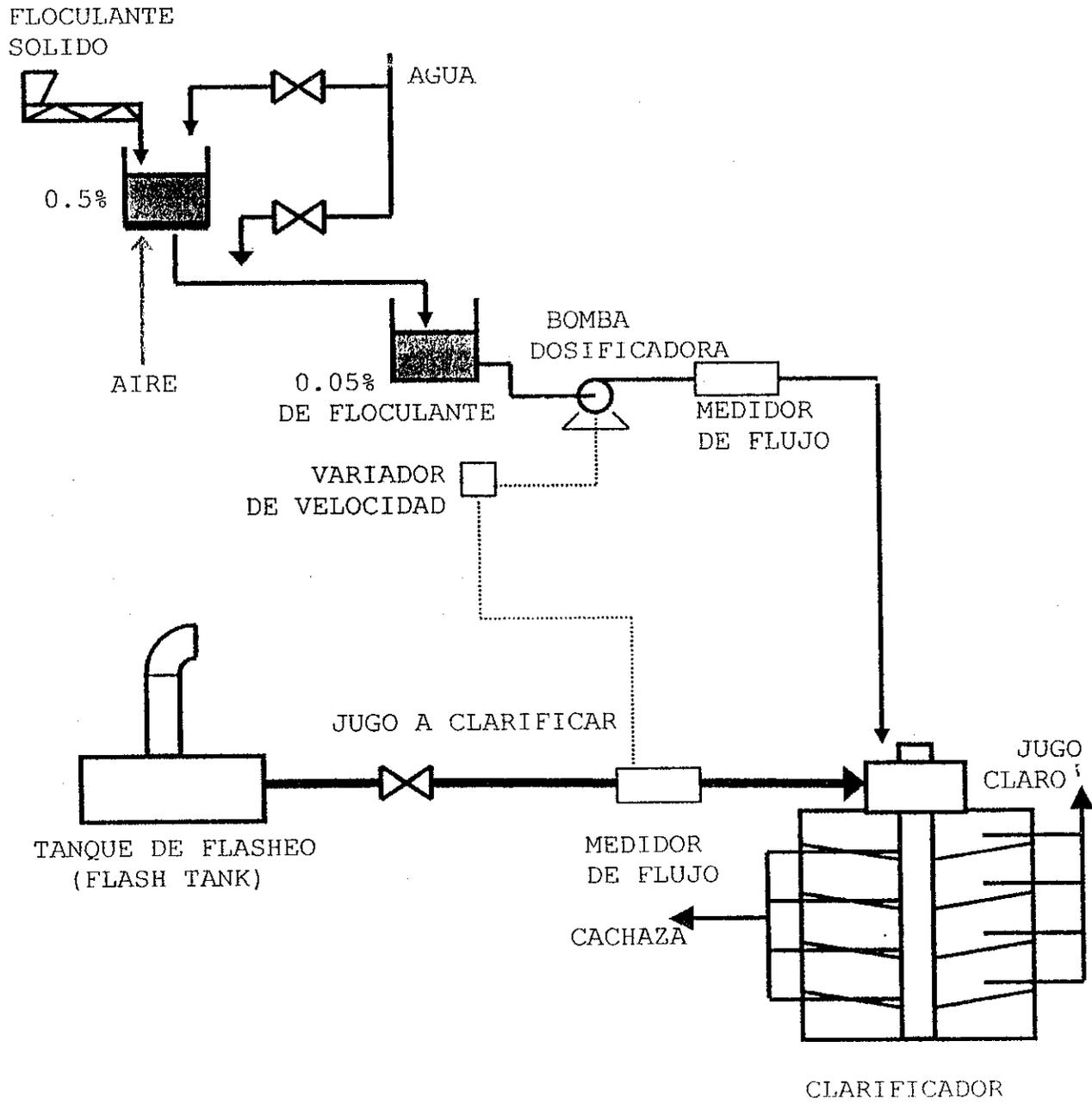
Al aumentar la dosificación, algunos floculantes pueden ayudar a incrementar la velocidad de sedimentación, pero los sólidos en suspensión en el jugo pueden también aumentar.

La introducción de las sustancias floculantes sintéticas (llamadas generalmente ahora polímeros floculantes) es uno de los avances más importantes en la clarificación de jugo de caña. Los polielectrólitos son en su mayor parte poliacrilamidas y se venden con varios nombres comerciales.

El método acostumbrado es añadir los polielectrólitos en solución diluída (0.05%) al jugo encalado y caliente.

Los polielectrólitos son generalmente poliacrilamidas, y uno de los productos a base de poliacrilamida más usados es el Separan AP30.

FIGURA 3  
FORMA DE PREPARACIÓN DEL FLOCULANTE



## 2. RESULTADOS

Tabla I Tiempo de Sedimentación

Condiciones: pH=6.9 Temperatura= 99°C (210°F)

ppm	Tiempo de sedimentación h:m:s	Volumen sedimentado (cm <sup>3</sup> )
0	0:30:10	300
3	0:10:56	300
4	0:08:28	300
5	0:06:49	350
6	0:04:56	500
7	0:05:31	600
8	0:08:25	350

A continuación se grafican los datos de la tabla anterior:

Figura 4 Gráfica de tiempos de sedimentación

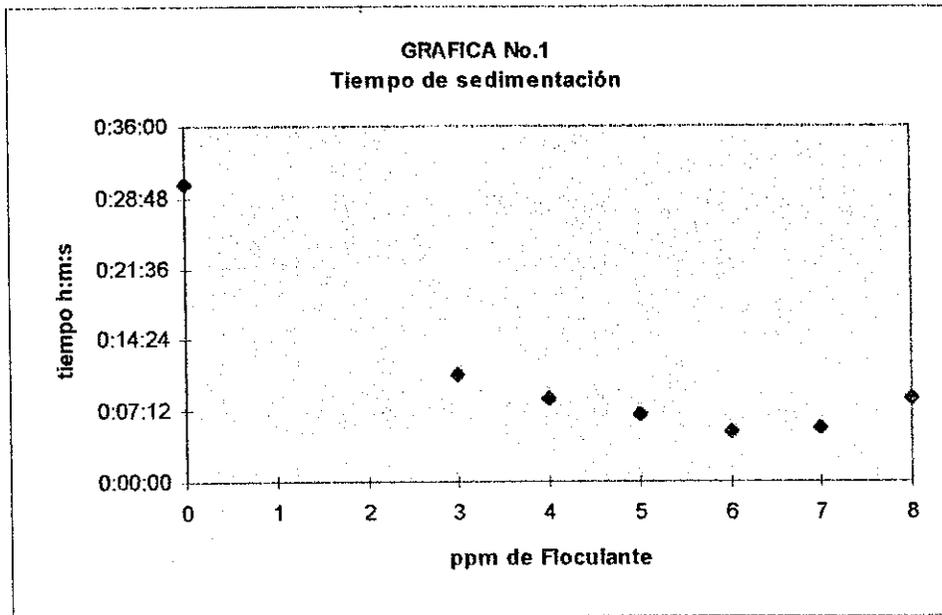


Tabla II

Cambio de absorbancia a 420 nm. del jugo que entra al clarificador y el jugo que sale del clarificador

Condiciones pH=6.9 Temperatura=  
102°C (215°F)

ppm	brix	abs 420	Diferencia abs jugo entrando - jugo saliendo
Jugo entrando	15.3	3.038	
5	14.7	2.554	0.484
5.5	14.9	2.564	0.474
6	14.6	2.415	0.623
7	14.8	2.03	1.008

A continuación se grafican los datos de la tabla anterior:

Figura 5 Gráfica de absorbancia a 420 nm.

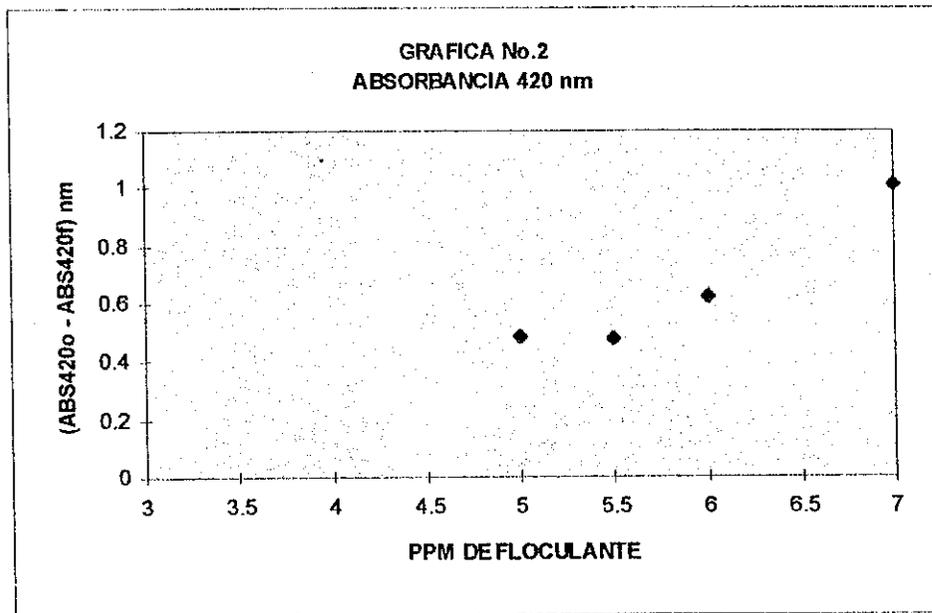


Tabla III Turbidez

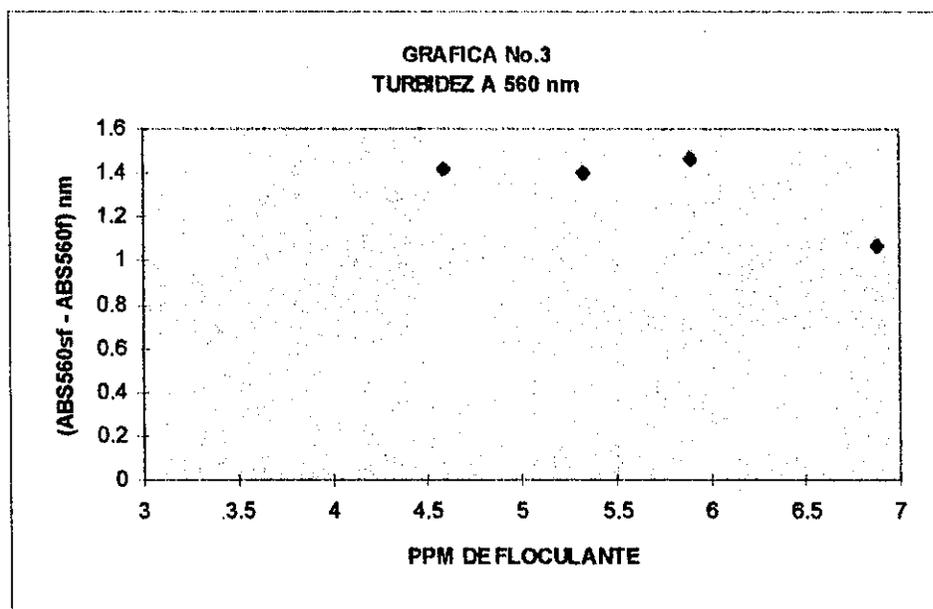
(La filtración se refiere a tomar la muestra en el laboratorio y filtrarla a través de membranas de 25 micrómetros de poro).

Condiciones pH= 7 Temperatura=  
101°C (214°F)

ppm	abs560 sin filtrar	abs560 filtrado	brix sin filtrar	Diferencia sin filtrar - filtrado
jugo entrando	3.36	0.335		
4.59	2.004	0.584	13.6	1.42
5.33	1.973	0.569	13.5	1.404
5.9	1.977	0.517	13.6	1.46
6.88	1.397	0.327	13	1.07

A continuación se grafican los resultados de la tabla anterior:

Figura 6 Gráfica de turbidez a 560 nm.



### 3. EXPLICACIÓN DEL MÉTODO EXPERIMENTAL, DISCUSIÓN DE RESULTADOS OBTENIDOS

#### 3.1 Experimento No.1

El experimento 1 tuvo como objetivo obtener el tiempo de sedimentación del flóculo con diferentes dosis de floculante, así como observar como ocurre la precipitación si no se le agrega cal al jugo y no se obtiene un pH adecuado (entre 6.5 y 7).

El floculante utilizado en la prueba es Separan AP30.

Se tomaron varias muestras de jugo a un pH de 6.9 y una temperatura de 99°C(210°F) , las cuales fueron vertidas en recipientes cónicos con marcas de volumen desde 1 cm<sup>3</sup> a 1000 cm<sup>3</sup>.

Se tomó el tiempo en que los sólidos sedimentaron, así como el volumen de sólidos sedimentados, obteniéndose los datos de la tabla I y la gráfica 1.

Luego se tomó una muestra de jugo sin alcalizar, se calentó a 100°C(212°F) y se vertió en los recipientes cónicos antes mencionados y se visualizó el comportamiento del jugo en cuanto a la sedimentación, el pH fue de 5.6.

Se puede observar en la gráfica 1 que el tiempo de sedimentación disminuye en la medida que la dosificación de floculante aumenta esto hasta una dosificación de 6 ppm, ya que de este punto hasta 8 ppm se observa que el tiempo de sedimentación aumenta de 5 a 8.5 minutos. "El exceso de la dosificación puede tener un efecto adverso "(2), ya que puede disminuir la velocidad de sedimentación, además "los sólidos en suspensión en el jugo pueden también aumentar" (2).

Este hecho se debe a lo siguiente :  
la velocidad de sedimentación de las partículas está gobernada por la ley de stokes:

$$v = \frac{D_p^2 (d_p - d_l) g}{18 \mu}$$

En donde v: velocidad de sedimentación en p/s,  $D_p$  es el diámetro de la partícula en p,  $d_p - d_l$  es la diferencia de densidades de la partícula y el líquido en lbs/pie<sup>3</sup> y  $\mu$  es la viscosidad del líquido en lb/(pie.s).

Según la ley de Stokes, la velocidad de sedimentación es inversamente proporcional a la viscosidad del líquido, la cual aumenta en el jugo por la dosificación de floculante; este aumento de viscosidad llega a un punto tal, que es contraproducente para la sedimentación agregar una dosis más alta de floculante, en el presente caso la dosis óptima es 6 ppm, con las dosis de 7 y 8 ppm aumentó el tiempo de sedimentación además de observarse más sólidos en suspensión.

Con respecto a la muestra de jugo que no se le agregó cal, no se observó sedimentación alguna, mientras que teniendo cal y sin floculante sedimentó aunque en 25 minutos, mucho más tiempo que con floculante; por lo que se observa que la cal juega un papel importante en la sedimentación, produciendo el floculante una floculación secundaria.

### **3.2 Experimento No.2**

Para el experimento No.2 se tomaron varias muestras de jugo antes de entrar en el clarificador y saliendo del clarificador. Se cambió la dosificación y se esperó una hora cuarenta y cinco minutos para tomar la siguiente muestra y así para cada dosificación de floculante. La hora con cuarenta y cinco minutos y las ppm de floculante se calcularon de la siguiente manera:

tiempo medio de residencia =  $V/v_o$

En donde V es el volumen total del clarificador y  $v_o$  es el flujo volumétrico de jugo entrando al mismo.

En este caso el clarificador en el que fue hecho el experimento tiene un volumen de 265 m<sup>3</sup>(70000 gal) y se la alimentación del mismo fue de 0.042 m<sup>3</sup>/s(670 galones por minuto), datos que sustituidos en la fórmula dan como resultado 6268.20 s., aprox. 1 hora 45 minutos.

En cuanto a la dosificación de floculante se tienen los datos siguientes:

concentración del floculante: 0.05%

flujo de floculante: x, variable dependiendo de la dosificación

flujo de jugo entrando al clarificador: 0.042 m<sup>3</sup>/s (670 gpm)

peso específico del jugo: 1.08

$$\frac{x \text{ Kg floculante}}{1000000 \text{ Kgs. jugo}} * \frac{1000 \text{ Kg} * 1.08}{\text{m}^3 \text{ jugo}} * \frac{0.042 \text{ m}^3}{\text{s}} =$$

$$\frac{x * 0.000045 \text{ Kg}}{\text{s}}$$

$$\frac{x * 0.000045 \text{ Kgs floc} * 100 \text{ Kgs de solucion} * 1 \text{ m}^3}{\text{s}} = \frac{0.05 \text{ Kgs floculante}}{1000 \text{ Kgs}}$$

$$\frac{x * 0.000091 \text{ m}^3}{\text{s}}$$

para 3 ppm se dosificaron 0.00027 m<sup>3</sup>/s(4.34 gpm) de floculante

para 4 ppm se dosificaron 0.00037m<sup>3</sup>/s(5.79 gpm) de floculante

para 5 ppm se dosificaron 0.00046(7.24 gpm) de floculante

para 6 ppm se dosificaron 0.00055(8.69 gpm) de floculante

para 7 ppm se dosificaron 0.00064(10.14 gpm) de floculante

para 8 ppm se dosificaron 0.00073(11.58 gpm) de floculante

la solución utilizada es de 0.05% de Separan AP30.

La forma de dosificación y concentraciones se encuentran especificadas en el capítulo 1 .

Se obtuvieron los datos de la tabla II y gráfica 2 y se puede observar que el cambio de absorbancia a 420 nm del jugo entrando y saliendo luego del tiempo de residencia de 1:45 se mantiene casi constante hasta una dosificación de 6 ppm luego aumenta en 0.3 unidades el cambio de absorbancia al llegar a 7 ppm. Esto refleja que entre 6 y 7 ppm de dosificación se da una sedimentación considerable de las partículas que dan color al jugo.

### **3.3 Experimento No.3**

Chen y Colaboradores (13) demostraron que la efectividad de un floculante no se basa sólo en la velocidad de sedimentación, sino más bien en la claridad o transparencia del jugo clarificado. La claridad se determina leyendo la absorbancia del jugo, a 560 nm, antes

(A1) y después (A2) de la filtración, y expresando A1 y A2 como la turbiedad del jugo. Mientras más bajo sea este valor, mejor será la claridad.

Se tomaron muestras semejantes a las del experimento No.2 y parte de la muestra se filtró y la otra se analizó sin filtrar, a las dos se les hizo un examen en el espectrofotómetro a 560 nm de longitud de onda y se leyeron las absorbancias.

La diferencia de absorbancias a 560 nm vrs. las ppm de floculante aparecen en la tabla III y la gráfica 3 y se puede observar que a dosificaciones por debajo de 6 ppm la turbiedad se mantiene alrededor de 1.4 luego en el rango entre 6 y 7 ppm la turbiedad disminuye considerablemente hasta 1.

Luego de las pruebas realizadas se puede observar que el rango de dosificación más adecuado a este caso en particular es entre 5 y 8 ppm de floculante (Separan Ap30); sin embargo, "a causa de las diferencias en el peso y la estructura moleculares de los polímeros, además de las variaciones en las condiciones locales y las variedades de cañas, las características de sedimentación de un polímero varían, dependiendo de la influencia de las variables." (2) por lo que no se puede generalizar este rango a otros lugares que no hayan sido en donde se hizo el experimento, pero si se demuestra que hay un rango óptimo y que un exceso de dosis de floculante puede traer problemas en el proceso y un mayor gasto de operación.

## CONCLUSIONES

1. Para una buena clarificación de jugo este debe tener 93 y 104°C (200 y 220°F) y un pH entre 6 y 7; además, dosificación óptima de floculante.
2. La sedimentación de los sólidos del jugo de caña puede llevarse a cabo sin que se le dosifique floculante; sin embargo, no se obtienen los mejores resultados en cuanto a sólidos no precipitados y velocidad de sedimentación.
3. La sedimentación de los sólidos del jugo de caña no se puede dar, si no se le agrega la cantidad de cal adecuada para mantener el pH entre 6 y 7 (aprox. 0.075% del peso de jugo) aunque se le dosifique cualquier cantidad de floculante.
4. La dosificación de floculante que presentó los mejores resultados en los experimentos realizados es de 5 a 8 ppm, utilizando como floculante Separan AP30 a base de poliacrilamida en un clarificador Rapi-Dorr 444 y en condiciones promedio de 101°C(214°F) y pH=7.

## RECOMENDACIONES

1. Antes de dosificar un floculante en un proceso de sedimentación, es importante hacer un estudio similar al de la presente tesis, ya que una baja dosificación puede provocar sedimentación deficiente y exceso de floculante puede provocar un descenso de la velocidad de sedimentación y sólidos en suspensión; además de aumentar los gastos de producción.
2. No es recomendable generalizar los resultados obtenidos a otros lugares que no sean en donde se hicieron los experimentos, debido a que las características de floculación varían de un lugar a otro, por las condiciones locales y variedades de caña; pero si se demuestra que hay un rango óptimo y que un exceso de dosis de floculante puede traer problemas en el proceso y un mayor gasto de operación.

## REFERENCIAS

1. Copersucar, III Seminario de Tecnología Industrial, Centro de Tecnología Copersucar, Piracicaba-SP, 1a. edición, Brasil, Cooperativa de Productores de Cana, azúcar e Alcool do Estado de Sao Paulo Ltda.- COPERSUCAR, septiembre 1987 , pp.142
2. Chen, James C.P. MANUAL DEL AZUCAR DE CAÑA, México, Noriega editores, 1991, pp.180-186.
3. CHEN Y COLABORADORES, Sugar, Julio 1982 pp.23-31
4. CHEN, ASSCT, 1974, págs.61-67
5. GEANKOPLIS, Christie, Procesos de transporte y operaciones unitarias, segunda edición, México, CECSA, 1995. pp. 664.
6. HONIG, Pieter. PRINCIPIOS DE TECNOLOGIA AZUCARERA, TOMO I primera edición en español; México, Compañía Editorial Continental S.A. , Junio 1969. pp. 454.
7. Hugot E. MANUAL PARA INGENIEROS AZUCAREROS, 7a. impresión México, Cía.Editorial Continental, S.A. de C.V México, junio 1984. pp.289-306.
8. ISSCT 1974 PP.1176
9. J.COLLOID, SCI.,19,291 (1964)
- 10.LAM TOKING, Luis Gilberto, CLARIFICACION EN LA INDUSTRIA AZUCARERA, TEORIA Y EQUIPO, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala, Mayo de 1977.
- 11.LEVENSPIEL, Octave, INGENIERIA DE LAS REACCIONES QUIMICAS, segunda edición, México, Editorial Reverté S.A. 1995 pp. 112.

12. PERRY, Robert, MANUAL DEL INGENIERO QUÍMICO ,Tomo V, pp. cap.19, pp. 58-70, sexta edición, México, McGraw-Hill 1992.
13. SHEPARD. SASTA, 1978, PÁGS 106-112
14. SOIL, SCI, 73, 485 (1952)
15. SUGAR J. Junio 1981, págs.22-23