

UNIVERSIDAD DE ORIENTE

NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI

ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA



**“USO DE PARTÍCULAS HIDROFOBADAS DE BAGAZO DE CAÑA  
EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS ACEITOSAS”**

REALIZADO POR:

José Angel Danglad Flores

**Trabajo de grado presentado ante la Universidad de Oriente como requisito parcial  
para optar al título de Ingeniero Químico**

Barcelona, marzo de 2010

UNIVERSIDAD DE ORIENTE

NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI

ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA



**“USO DE PARTÍCULAS HIDROFOBADAS DE BAGAZO DE CAÑA  
EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS ACEITOSAS”**

ASESOR

---

Ing. Químico Shirley Marfisi (Dra.)

**Asesor Académico**

Barcelona, marzo de 2010

UNIVERSIDAD DE ORIENTE

NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI

ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA



**“USO DE PARTÍCULAS HIDROFOBADAS DE BAGAZO DE CAÑA  
EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS ACEITOSAS”**

JURADO

---

Ing. Químico Shirley Marfisi (Dra.)

**Asesor Académico**

---

Ing. Químico. Alexis Cova (Ms.c)

**Jurado Principal**

---

Ing. Químico. Luis Moreno

**Jurado Principal**

Barcelona, marzo de 2010

## **RESOLUCIÓN**

***DE ACUERDO AL ARTÍCULO 41 DEL REGLAMENTO DE TRABAJOS DE GRADO: “LOS TRABAJOS SON DE EXCLUSIVA PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DE ORIENTE Y SÓLO PODRÁN SER UTILIZADOS A OTROS FINES CON EL CONSENTIMIENTO DEL CONSEJO DE NÚCLEO RESPECTIVO, QUIEN LO PARTICIPARÁ AL CONSEJO UNIVERSITARIO”.***

## **DEDICATORIA**

A DIOS, ahora y siempre.

A mi pueblo con todos sus rostros, manos y conciencias.

Para mis padres Pequi y Rene, de quienes me siento infinitamente orgulloso y agradecido.

A mi papá Miguel y mi abuelo Reinaldo, donde quiera que estén siempre contarán con su príncipe azul.

A mis hermanas Zorimar, Zulivis y Maylen, con quien estude muchísimo, pelié un poco más y luche hasta el final.

A mis compañeros de carrera, Guillermo, Laura, Leonel y Armi, gracias amigos.

A los 3 profesores que marcaron mi formación, la Dra. Shirley Marfisi a quien admiro, mi hermano mayor Msc. Alexis Cova y el mejor de todos mis profesores Msc. Arturo Rodulfo un modelo a seguir, un agradecimiento especial.

Y para que no se sienta mal a mí querida negra Tania.

A todos aquellos ingenieros químicos que se dediquen con entusiasmo y entrega a la investigación, nuestro trabajo es resolver problemas que otros no pudieron.

## **AGRADECIMIENTOS**

A DIOS, ahora y siempre.

A la Nación y el sistema de educación público.

A la Universidad de Oriente por formarme como profesional.

Al Departamento de Ingeniería Química por formarme como ingeniero.

Al laboratorio de Sistemas Dispersos y Ambiente por formarme como investigador.

A la empresa METOR cuyo aporte LOCTI permitió obtener el equipo Turbiscan MA2000

A la Dra. Shirley Marfisi por honrarme con su asesoría.

Al Msc. Alexis Cova por sus aportes, ideas y alientos a este trabajo.

A Guillermo Linero por su apoyo intelectual.

A May por prestarme la bata.

## RESUMEN

En esta investigación se realizó la aplicación de partículas hidrofobadas de bagazo de caña en el tratamiento de aguas aceitosas, examinando el efecto de la granulometría ( $\mu\text{m}$ ) y del porcentaje de parafina (% m/m) sobre la densidad y porosidad del lecho y en el porcentaje de remoción de hidrocarburos. Los valores de densidad de lecho oscilaron entre 0,0564 y 0,0954 g/ml, mientras que la porosidad varió entre 0,8202 y 0,9281. El mayor porcentaje de remoción se ubicó en 94,98% para la operación discontinua, correspondiendo a un diámetro promedio de partículas de 457  $\mu\text{m}$ ; encontrándose que la separación de hidrocarburos se mantiene prácticamente invariable respecto a la composición del lecho hidrofobado con más de 33% de parafina. La condición óptima del lecho para la mayor remoción de hidrocarburos fue 300  $\mu\text{m}$  de diámetro de partícula y 33% de parafina. El mecanismo de adhesión se ajustó a un modelo potencial, obteniendo el coeficiente y el exponente en 0,011 y 0,559 respectivamente. En operación continua, con lecho hidrofobado con 30% de parafina y partículas de 457  $\mu\text{m}$ , se halló un tiempo de contacto inicial de 10 minutos, para una altura de lecho de 26,5 cm, un máximo de remoción de 85,68%, tardando 9 h en agotarse la capacidad del lecho.

## CONTENIDO

	<b>Página</b>
RESOLUCIÓN.....	IV
DEDICATORIA.....	V
AGRADECIMIENTOS.....	VII
RESUMEN.....	IX
CONTENIDO.....	X
LISTA DE TABLAS.....	XVI
LISTA DE FIGURAS.....	XIX
 CAPÍTULO I	
INTRODUCCIÓN.....	<b>¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.</b>
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	23
1.2 OBJETIVOS.....	25

1.2.1 Objetivo General .....	25
1.2.2 Objetivos Específicos.....	25
CAPÍTULO II	
MARCO TEÓRICO .....	26
2.1 ANTECEDENTES .....	26
2.2 EMULSIONES Y SU CLASIFICACIÓN .....	27
2.2.1 Clasificación de las emulsiones .....	29
2.3 BAGAZO DE CAÑA.....	31
2.4 CARACTERISTICAS DE LAS PARTÍCULAS .....	32
2.4.1 Densidad de las partículas.....	32
2.4.2 Densidad del lecho .....	34
2.4.3 Porosidad.....	34
2.4.4 Granulometría .....	35
2.5 CONTACTO TRIFASICO INVOLUCRANDO UN SÓLIDO .....	37

2.5.1 Equilibrio y ángulo de contacto .....	37
2.5.2 Consideraciones energéticas. ....	39
2.5.3 Expansión y mojabilidad.....	40
2.5.4 Influencia de los surfactantes. ....	41
2.5.5 Crecimiento de película. ....	42
2.5.5.1 Esfuerzos tensores por contacto .....	43
2.6 Flujo a través de lechos empacados.....	44
2.6.1.1 Flujo laminar en lechos empacados .....	45
2.6.1.2. Flujo turbulento en lechos empacados .....	48
2.6.1.3. Ley de Darcy .....	49
2.6.1.4. Factores de forma.....	50
2.6.1.5 Mezclas de partículas .....	51
2.6.2. Diseño de lechos empacados.....	52
2.6.2.1 Concentración de la curva de avance .....	54

2.6.2.3 Capacidad de la columna y método de diseño para aumento de escala .....	55
---	----

### CAPITULO III

METODOLOGÍA.....	58
------------------	----

3.1 CARACTERIZACIÓN DE LAS PARTÍCULAS DE BAGAZO DE CAÑA .....	58
---	----

3.1.1 Análisis granulométrico (ASTM-E11).....	58
---	----

3.1.2. Preparación e hidrofobación de las partículas.....	62
---	----

3.1.2 Densidad del lecho mediante la norma ASTM D 2854-96 .....	64
---	----

3.1.3. Densidad de materiales con alta porosidad: método propuesto por Venegas67	
--	--

3.1.4 Morfología del material, empleando registro micrográfico .....	73
--	----

3.2 DETERMINACIÓN DEL EFECTO DEL PORCENTAJE DE PARAFINA Y GRANULOMETRÍA DE LAS PARTÍCULAS DE BAGAZO HIDROFOBADO, SOBRE LA CANTIDAD DE ACEITE SEPARADO DE UNA EMULSIÓN O/W SINTÉTICA ...	74
---	----

3.2.1 Medición de la densidad del hidrocarburo .....	75
--	----

3.2.2 Construcción de la curva de calibración para el Turbiscan MA2000 .....	77
--	----

3.2.3 Diseño experimental .....	88
---------------------------------	----

3.3 IDENTIFICACIÓN EXPERIMENTAL DEL MECANISMO DE ADSORCIÓN DE LOS COMPUESTOS HIDROCARBUROS SOBRE LAS PARTÍCULAS HIDROFOBADAS DE BAGAZO DE CAÑA ..... 99

3.5 PROPUESTA DE UN SISTEMA ADSORBENTE DE PARTÍCULAS HIDROFOBADAS DE BAGAZO A ESCALA DE LABORATORIO ..... 103

#### CAPITULO IV

DISCUSIÓN DE RESULTADOS CONCLUSIÓN Y RECOMENDACIONES ..... 112

4.1 CARACTERIZACIÓN DE LA GRANULOMETRÍA, MORFOLOGÍA Y DENSIDAD DE LAS PARTÍCULAS DE BAGAZO DE CAÑA HIDROFOBADO ..... 112

4.1.1 Distribución granulométrica ..... 112

4.1.2 Densidad de lecho ..... 113

4.1.3 Porosidad de lecho ..... 116

4.1.4 Morfología de las partículas ..... 119

4.2. EFECTO DEL PORCENTAJE DE PARAFINA Y DE LA GRANULOMETRÍA DE LAS PARTÍCULAS DE BAGAZO HIDROFOBADO, SOBRE LA CANTIDAD DE ACEITE SEPARADO DE UNA EMULSIÓN O/W SINTÉTICA ..... 123

4.3 MODELO MATEMÁTICO PARA EL PROCESO DE ADHESIÓN ..... 130

4.4 PRUEBA DEL MONTAJE EXPERIMENTAL PARA ENSAYO DE LECHO FIJO  
CON BAGAZO HIDROFOBADO ..... 134

4.5 CONCLUSIONES..... 142

4.6 RECOMENDACIONES ..... 145

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS ..... 147

ANEXOS

ANEXO A .....**¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**

A.1 Reporte del programa Statgraphics Plus sobre el análisis de varianza para la densidad de lecho respecto a la granulometría y el porcentaje de cera.**¡Error! Marcador no definido.**

A.2 Reporte del programa Statgraphics Plus sobre el análisis de varianza para la porosidad de lecho respecto a la granulometría y el porcentaje de cera..... **¡Error! Marcador no definido.**

A.4 Reporte del programa Statgraphics Plus sobre el análisis regresión multiple para la caída de presión respecto al tiempo de operación de lecho continuo. .... **¡Error! Marcador no definido.**

ANEXO B .....**¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**

ANEXO C .....;ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.

ANEXO D .....;ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.

ANEXO E.....;ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.

## LISTA DE TABLAS

	<b>Página</b>
Tabla 3.1 Datos de análisis granulométrico. ....	60
Tabla 3.2 Porcentaje másico de partículas de bagazo de caña. ....	61
Tabla 3.3 Volúmenes y masas de lecho medidos para las formulaciones preparadas.....	65

Tabla 3.4 Valores de densidad de lecho (g/ml) determinadas en ensayo para las formulaciones preparadas.....	67
Tabla 3.5 Valores promedio de densidad de lecho (g/ml) para las diferentes formulaciones preparadas.....	67
Tabla 3.6 Valores de volumen gastados de kerosén $V_K$ (ml).....	69
Tabla 3.7 Valores de porosidad de lecho (g/ml) determinadas en ensayo para las formulaciones preparadas.....	70
Tabla 3.8 Valores promedio de porosidad de lecho (g/ml) para las diferentes formulaciones preparadas.....	72
Tabla 3.9 Valores de desviación estándar para los ensayos de densidad y porosidad del lecho.....	73
Tabla 3.10 Datos del kerosén generados durante prueba de densidad por la técnica del picnómetro.....	76
Tabla 3.11 Valores de densidad determinados para el kerosén.....	77
Tabla 3.12 Valores medidos y promediados del porcentaje de transmisión y retrodifusión variando la fracción másica de la fase dispersa.....	83
Tabla 3.13 Valores promedios de la transmisión y retrodifusión respecto a la fracción volumétrica de kerosén y su equivalente en concentración (ppm).....	85

Tabla 3.14 Porcentajes de transmisión del agua luego de la prueba de jarra. ....	90
Tabla 3.15 Valores promedio de la transmisión luego de la prueba de jarra. ....	92
Tabla 3.16 Valores de transmisión aportados por los compuestos solubles del bagazo en agua destilada. ....	95
Tabla 3.17 Valores promedios de transmisión corregidos .....	95
Tabla 3.18 Resultados del porcentaje de remoción de hidrocarburos respecto a la granulometría y porcentaje de cera.....	97
Tabla 3.19 Valores promedios de la remoción de hidrocarburos .....	98
Tabla 3.20 Desviación estándar de los resultados sobre la remoción .....	98
Tabla 3.21 Valores estimados de la pruebas de adsorción isotérmica.....	101
Tabla 3.23 Datos recopilados en el montaje experimental de lecho adsorbente. ....	110
Tabla E.1 Propiedades físicas de materiales adsorbentes comunes.[31]; <b>Error! Marcador no definido.</b>	

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Página</b>
Figura 3.1 Materiales y equipos para análisis granulométrico: .....	59
Figura 3.2 Equipos y materiales para la preparación de partículas: (a) recipientes de lavado; (b) estufa y bandeja; (c) materiales, sustancias y equipos para la hidrofobación.....	64
Figura 3.3 Materiales y equipos para el ensayo de densidad: .....	64
Figura 3.4 Bureta de 50 ml y cilindro graduado con lecho de partículas .....	68
Figura 3.5 Estabilidad de la dispersión con 500 ppm de kerosén.....	80
Figura 3.6 Curvas de transmisión y retrodifusión respecto .....	86
Figura 3.7 Curva de ajuste entre la concentración de kerosén disperso .....	87
Figura 3.8 Columna de carbón activado escala semi-piloto.[22] .....	104
Figura 3.9 Montaje experimental para la evaluación de lecho adsorbente.....	105
Figura 3.10 Columna de lecho empacado diseñada en trabajo.....	108

Figura 4.1 Curvas granulométricas.....	113
Figura 4.2 Superficie de respuesta de la densidad de lecho .....	114
Figura 4.3 Gráfico de medias de la densidad de lecho respecto a la granulometría.....	115
Figura 4.4 Gráfico de medias de la densidad de lecho respecto al porcentaje de cera.....	115
Figura 4.5 Superficie de respuesta de la porosidad de lecho respecto .....	117
Figura 4.6 Gráfico de medias de la porosidad del lecho respecto a la granulometría.....	118
Figura 4.7 Gráfico de medias de la porosidad del lecho respecto al porcentaje de cera. ...	119
Figura 4.8 Micrografía de partícula (1.251 $\mu\text{m}$ ) imagen ampliada 4 veces. ....	120
Figura 4.9 Micrografía de partícula (720 $\mu\text{m}$ ) imagen ampliada 4 veces. ....	120
Figura 4.10 Micrografía de partícula (457 $\mu\text{m}$ ) imagen ampliada 10 veces. ....	121
Figura 4.11 Micrografía de partícula (208 $\mu\text{m}$ ) ampliada 10 veces. ....	121
Figura 4.12 Perspectivas de la superficie de respuesta del porcentaje de remoción de hidrocarburos respecto a la granulometría y el porcentaje de parafina. ....	126
Figura 4.13 Gráfico de medias de la separación de hidrocarburo .....	126

Figura 4.14 Gráfico de medias de la separación de hidrocarburo .....	127
Figura 4.15 Evolución temporal de una muestra de partícula hidrofobada.....	128
Figura 4.16 Humectación del material fibroso y granular: (a) gota de kerosén sobre material fibroso. (b) gotas de kerosén sobre material granular. ....	129
Figura 4.17 Ángulos de contacto del aceite respecto a la mojabilidad: .....	130
Figura 4.18 Modelo matemático para los datos experimentales de adhesión. ....	131
Figura 4.19 Surfactante ocupando interface O/W. ....	134
Figura 4.20 Nivel de líquido bajo el lecho. ....	137
Figura 4.21 Evolución respecto a al tiempo de la concentración .....	139
Figura B.1 Patrón de medición micrométrico (4 mm) para figuras 4.8 y 4.9.....	<b>¡Error!</b>
<b>Marcador no definido.</b>	
Figura B.2 Patrón de medición micrométrico (1 mm) para figura 4.10.¡Error!	<b>Marcador no definido.</b>
Figura B.3 Patrón de medición micrométrico (1 mm) para figura 4.11.¡Error!	<b>Marcador no definido.</b>
Figura C.1 Hoja técnica del equipo Turbiscan MA2000.....	84

Figura C.2 Efecto de la fracción volumétrica sobre la transmisión y retro difusión de luz en una suspensión de látex (poliestireno en agua) [20]...... 85

Figura D.1 Calibración de la bomba peristáltica se utilizando el agua destilada... ..... 86

Figura D.2 Calibración de la plancha Ika C-MAG HS 7. .... 86

# CAPÍTULO I

## EL PROBLEMA

### 1.1 Planteamiento del problema

La industria de la refinación del petróleo se sirve de aguas de proceso en las operaciones de producción y de mantenimiento, ya sea que ésta se encuentre en fase líquida o vapor, como solvente de reactivos o productos, como fluido de enfriamiento o como fluido de lavado. Procedimientos como el despuntado con vapor de los componentes volátiles durante la destilación, el hidrotratamiento y la desintegración catalítica, ponen en contacto íntimo diferentes cortes del petróleo e importantes volúmenes de agua. Esta última es recuperada de cada unidad de proceso como agua aceitosa, que por lo general contiene fracciones de hidrocarburos suspendidos o emulsionados; además de compuestos mercaptanos, cloruros, sulfuros, fenoles y amoníaco.

La disposición y tratamiento de las aguas aceitosas deriva del grado de contaminación y del sistema agua-aceite formado. Por un lado, se espera que las aguas de enfriamiento presenten un nivel de contaminación mínimo derivado de fugas en el equipo de intercambio o a derrames; por otra parte, las aguas de desecho que interactúan directamente con aceites, o que están sujetas a contaminación por aceite emulsionado, en primera instancia se tratan en separadores agua-aceite, reduciendo posteriormente los contaminantes persistentes a la separación por gravedad mediante tratamiento secundario en un reactor biológico, para eliminar gran parte de los contaminantes orgánicos y los sólidos remanentes.[1]

Hay pocos métodos físicos, químicos y biológicos conocidos como tratamiento terciario, entre los que se cuentan la adsorción con carbón activado y la filtración. A medida que se expande el sector industrial y las reglamentaciones ambientales se vuelvan más rigurosas en la protección de los recursos hídricos, los tratamientos terciarios adquieren mayor relevancia.

Una opción más refinada la ofrecen los filtros coalescedores, que no son más que un medio poroso compuesto de fibras hidrófobas, sobre las cuales las gotas de aceite se adhieren y coalescen entre ellas. Cuando una gota formada alcanza un cierto tamaño, el arrastre de la corriente de agua la traslada hasta un tanque de sedimentación donde se separa por gravedad.

A fin de maximizar la remoción de componentes hidrocarburos en efluentes, este trabajo plantea investigar la aplicación de un sistema de tratamiento basado en el potencial adsorbente de partículas hidrofobadas de bagazo de caña, utilizando para ello un lecho de partículas que permitan retener la fracción de aceite contaminante. Tal alternativa representa una oferta original en el tratamiento de aguas aceitosas, que combina las operaciones de adsorción y filtrado; valiéndose de materias primas locales, de bajo costo y abundante disposición. Esto último en concordancia con los postulados de Arboleda, quien plantea respecto al tratamiento de agua para naciones en desarrollo, la necesidad de utilizar preferiblemente materiales locales, siempre y cuando sean de buena calidad [2]. A su vez, la disposición final de los contaminantes y el medio adsorbente se facilita, dado el potencial combustible de ambos materiales, reduciendo los compromisos y dificultades técnicas del tratamiento biológico.

La investigación se desarrolló en las instalaciones del Laboratorio de Sistemas Dispersos y Ambiente, SDA, del Departamento de Ingeniería Química, de la Universidad de Oriente, como aporte al desarrollo de tecnologías en materia de sistemas dispersos con aplicaciones ambientales, desde una perspectiva innovadora y endógena.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo General**

Estudiar el uso de partículas hidrofobadas de bagazo de caña en el tratamiento de aguas aceitosas.

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

1. Caracterizar la granulometría, morfología y densidad de las partículas de bagazo de caña hidrofobado.
2. Determinar el efecto del porcentaje de parafina y granulometría de las partículas de bagazo hidrofobado, sobre la cantidad de aceite separado de una emulsión O/W sintética.
3. Identificar experimentalmente el mecanismo de adsorción de los compuestos hidrocarburos sobre las partículas hidrofobadas de bagazo de caña.
4. Proponer un sistema de lecho adsorbente de partículas hidrofobadas de bagazo a escala laboratorio.

## CAPÍTULO II

### MARCO TEÓRICO

#### 2.1 Antecedentes

El empleo de partículas celulósicas en la separación de agua en aceite se reporta en la investigación de Sun Dezhi y col. [3] sobre desemulsión, usando columnas empacadas y de agitación. Estos investigadores encontraron un rendimiento superior al 97% al usar como fibra natural una viruta de madera, bajo condiciones óptimas. Las columnas coalescentes empacadas resultaron más eficientes que la columna de agitación, en cuanto a la desemulsión.

Speth y col. [4] utilizaron lechos de fibras para separar por coalescencia dispersiones líquido-líquido, con tamaños de gotas entre 1 y 3  $\mu\text{m}$ , en las cuales el agua constituía la fase continua, mientras que la fase dispersa representaba una pequeña fracción del volumen. Por otro lado, Villarroel [5] utilizó aserrín para aumentar la porosidad en lechos empacados para el tratamiento de suelos impactados con hidrocarburos, encontrando que para fluidos laminares a través del lecho se obtuvo un comportamiento lineal entre la caída de presión y las propiedades del sistema, tales como porosidad, diámetro de partículas y concentración del fluido añadido al empaque.

Chocrom y col. [6] realizaron experiencias en el laboratorio combinando los procedimientos de filtración, adsorción e intercambio iónico, con el fin de purificar el agua de procesos de una planta que contenía los contaminantes típicos en aguas aceitosas; trabajando en modalidad continua con emulsiones sintéticas, preparadas a partir de agua y aceite lubricante contactados.

Garnica y col. [7] estudiaron la remoción de petróleo en agua utilizando una columna de lecho fijo, empleando como adsorbente vermiculita expandida e hidrofobada. Determinaron que el proceso está influenciado por la concentración inicial del petróleo, diámetro de las partículas, altura del empaque, tiempo de contacto entre las fases (sólido-líquido) y la velocidad del fluido a través de la columna. Usaron 3 granulometrías y 3 alturas de empaque, 10, 20 y 35 cm y encontraron que la adsorción estaba representada por la isoterma de Freundlich. El mejor resultado fue obtenido con la menor granulometría. No obstante, el uso de minerales como soporte del lecho conlleva a dos inconvenientes importantes, en primer lugar la disponibilidad limitada del recurso, y por otra parte, la disposición del lecho gastado, su regeneración y tratamiento. Tales dificultades podrán resolverse empleando bagazo de caña, un subproducto abundante de la industria azucarera de poder calorífico comprobado.[8]

La presente investigación se relaciona con las anteriores porque su finalidad fue ofrecer una alternativa de tratamiento a las aguas aceitosas de proceso. Para ello, se utilizó una columna empacada con fibra celulósica proveniente del bagazo de caña, hidrofobado con parafina para tal fin; incorporando además la adhesión de los hidrocarburos sobre el lecho. Para brindar estabilidad a la dispersión kerosén-agua se empleó el surfactante no iónico Span 80 (Monooleato de Sorbitán) como emulsionante, en concordancia con trabajos previos.[3]

## **2.2 Emulsiones y su clasificación**

El texto tradicional define las emulsiones como dispersiones de gotas de un líquido (la fase interna o discontinua) en un segundo líquido inmiscible (la fase externa continua) con el primero, que presentan una cierta estabilidad respecto a la coalescencia; estabilidad cuya magnitud o escala de tiempo depende esencialmente de las aplicaciones. [9]

La estabilidad, en el sentido de la inhibición de la coalescencia de las gotas entre sí, está asegurada por la presencia de una pequeña cantidad (en general, menos de 1 %) de una tercera sustancia denominada emulsionante, que es un frecuentemente un surfactante.

Un surfactante es una sustancia anfífila que reduce la tensión superficial o interfacial y puede clasificarse según su aplicación industrial o doméstica, o su disociación en agua en surfactantes aniónicos, catiónicos, anfóteros, siliconados, fluorados y polímeros de asociación.[9]

Cuando dos gotas de la fase dispersa están ubicadas a distancia suficientemente pequeña (por ejemplo, una distancia más pequeña que su radio) entonces están sometidas a dos tipos de fuerzas. De un lado las fuerzas atractivas de van der Waals que tienen que ver con la masa de materia presente en las dos gotas, y por otra parte las fuerzas de repulsión que dependen de las propiedades interfaciales que el surfactante adsorbido les confiere y que resulta en una fuerza repulsiva. La presencia de surfactante en las dos interfaces que se acercan puede producir varios tipos de fenómenos de naturaleza eléctrica, esférica, entrópica u osmótica.[9]

Las fuerzas atractivas dependen del volumen de las gotas vecinas, mientras que las fuerzas repulsivas dependen del surfactante adsorbido, y por tanto de las superficies expuestas de las gotas, es decir del área superficial de estas. Considerando que las gotas son esferas del mismo diámetro, entonces se aplican las formulas geométricas que determinan tales magnitudes. Como consecuencia, el área por unidad de volumen de una emulsión monodispersa (con gotas idénticas), llamada área específica  $\sigma$  (1/m) es.

$$\sigma = \frac{4\pi R^2}{\frac{4}{3}\pi R^3} = \frac{3}{R} \quad (\text{Ec.2.1})$$

Esta relación indica que el área interfacial de una emulsión aumenta cuando su diámetro disminuye, y en forma inversamente proporcional si se trata de una emulsión monodispersa. Por tanto una disminución del tamaño de gota favorece las fuerzas repulsivas (que dependen del área) respecto a las fuerzas atractivas (que dependen del volumen). Es por esta razón que en los sistemas dispersos (que sean emulsiones, suspensiones o espumas), la fragmentación de la materia hasta un tamaño de "grano" relativamente pequeño, favorecen las fuerzas repulsivas que aseguran la estabilidad de la dispersión. Al contrario cualquier fenómeno susceptible de favorecer el crecimiento de tamaño de gota o la aglutinación de gotas (lo que resulta en mayor masa) tiende a desestabilizar la emulsión.[9]

### 2.2.1 Clasificación de las emulsiones

La palabra emulsión se ha usado y se usa en diferentes tipos de sistemas y por eso es importante precisar que las macroemulsiones, son dispersiones de líquido en

líquido con un tamaño de gota en el rango 1-100  $\mu\text{m}$ , el cual puede eventualmente extenderse en casos especiales al rango 0,1-500  $\mu\text{m}$ . Las gotas comprendidas en el rango 1-100  $\mu\text{m}$  pueden observarse con un microscopio óptico, y en general son sensibles a la gravedad, es decir, que sedimentan de acuerdo a la ley de Stokes, siempre y cuando la diferencia de densidad de los dos líquidos no es despreciable.[9]

En lo que sigue, se utilizará la nomenclatura anglosajona para definir las emulsiones. Los dos líquidos se denominan agua ( $W = \textit{water}$ ) y aceite ( $O = \textit{oil}$ ), que sean realmente estos líquidos o que representen la fase polar y la fase apolar. El uso de la simbología inglesa se debe a que en castellano ambas palabras empiezan por la misma letra.

Las emulsiones simples se llaman O/W (*oil-in-water*) cuando se trata de gotas de aceite dispersadas en agua, y (W/O) cuando es lo opuesto. Las emulsiones múltiples son sistemas líquido-líquido dispersados en los cuales la fase interna es también una emulsión.[9]

Una emulsión múltiple contiene en realidad sólo dos fases, pero una porción de la fase externa está dispersada en forma de pequeñísimas gotas dentro de las gotas de la fase interna. Se usa el símbolo W/O/W para una emulsión múltiple del tipo agua-en-aceite en agua, y O/W/O para la emulsión aceite-en-agua en aceite. Es por supuesto posible que las pequeñas gotas que están en las gotas de fase interna estén compuestas de un líquido diferente de la fase externa. En tal caso se usa una simbología particular:  $W_1/O/W_2$  o  $O_1/W/O_2$ , donde el índice 1 se refiere al líquido que compone las pequeñísimas gotas y el índice 2 indica la fase externa.[9]

Una biemulsión es cuando se mezclan dos emulsiones semejantes, a saber con fase externa idénticas o compatibles. Desde el punto de vista práctico, se trata de una emulsión en la cual se encuentran dos tipos de gotas dispersadas en una misma fase externa. Si las gotas son de mismo líquido la diferencia puede deberse a su granulometría, es decir su distribución de tamaño. Tales biemulsiones pueden presentar propiedades reológicas interesantes. Por otra parte, si los dos tipos de gotas son de naturaleza diferente pueden eventualmente coalescer entre sí y producir fenómenos particulares como reacción química, polimerización, etc.[9]

### **2.3 Bagazo de caña**

Hoy el bagazo está definido por la Sociedad Internacional de Técnicos de la Caña de Azúcar como el residuo de la trituración de la caña de azúcar en uno o varios molinos. En la fabricación de azúcar, la caña contiene cierta porción de hojas, raíces y materias extrañas, la cual se desmenuza en molinos de martillo o rotatorios, después de lo cual se extrae el jugo haciendo pasar la masa por varios molinos de rodillo. El residuo fibroso resultante de esta operación es el bagazo.[8]

El color del bagazo varía entre amarillo-gris sucio y verde pálido. El bagazo es muy voluminoso y el tamaño de sus partículas no es uniforme. La variación depende de la variedad de caña que se muele y de la eficiencia de las instalaciones de molienda. El producto de molinos o trapiches más eficaces está, por lo general, bastante desintegrado y la longitud media de las partículas es una pulgada o menos. La composición del material cuando sale de los molinos es normalmente, la siguiente: 49% de humedad, 6% de sólidos soluble y 45% de sólidos insolubles o fibra cruda, aproximadamente.[8]

Físicamente, el bagazo se compone de dos partes celulósicas distintas: la fracción de fibras relativamente largas y de paredes gruesas, derivadas en gran parte de la corteza, y un grado menor de los haces fibrovasculares dispersos en el interior del tallo de la caña y una segunda fracción medular derivada de las células de las paredes delgadas del tejido fundamental o parénquima del tallo. En la estructura del tallo de la caña esas fracciones están tan íntimamente ligadas entre sí; después de la operación de molienda sólo puede efectuarse una separación en grado muy limitado. La fibra de bagazo se parece a las de algodón y lana porque tiene estructura espiral. La longitud media de las fibras es de 1,0 y 4,0 mm, y su anchura varía entre 0,010 y 0,04 mm.[8]

El uso más importante del bagazo es como combustible para el funcionamiento de las fábricas de azúcar donde se produce. Cuando se quema eficientemente su valor como combustible es aproximadamente de 1.500 cal/kg. El valor como combustible de una tonelada de bagazo con 49% de humedad, que se quema al 100% de aire en exceso, es aproximadamente igual al de un barril de combustible.[8]

## **2.4 Características de las partículas**

### **2.4.1 Densidad de las partículas**

Venegas y col. [10] propusieron un método para determinar la densidad de materiales con alta porosidad. Para el método experimental de la impermeabilización se llenan los poros de la muestra cerámica con parafina, generando un aumento en el volumen de la muestra como en su masa, entonces las mediciones de masa y volumen no corresponden a la densidad original de la muestra. La densidad de la muestra de

sólido original sin ningún procedimiento químico se designa con la letra  $\rho_s$ , equivalente a:

$$\rho_s = \frac{m_s}{V_s} \quad (\text{Ec.2.2})$$

donde  $m_s$  es la masa inicial de la muestra,  $V_s$  es el volumen inicial de la muestra. Al llenar los poros con parafina la masa aumenta, ésta se designará como  $m_f$ , de la misma manera el volumen de la muestra aumenta designándose como  $V_f$ , calculados por:

$$m_f = m_s + m_p \quad (\text{Ec.2.3})$$

$$V_f = V_s + V_p \quad (\text{Ec.2.4})$$

donde  $m_p$  es la masa de la parafina dentro de la muestra,  $V_p$  es el volumen de la parafina en la muestra. La relación entre la masa de la parafina y el volumen de la misma se conoce como densidad de la parafina  $\rho_p$ , cuyo valor se conoce previamente por medio de métodos experimentales como la técnica del picnómetro.

La densidad original se obtiene de la ecuación (2.2), despejando  $V_s$  de (2.4) y se reemplaza, luego el volumen de la parafina es la masa de la parafina dividida entre su densidad. La masa de la parafina según (2.3) es  $m_f - m_s$ , al reemplazar se obtiene la densidad inicial de la muestra:

$$\rho_s = \frac{m_s}{V_f - m_p / \rho_p} = \frac{m_s}{V_f - (m_f - m_s) / \rho_p} = \frac{\rho_p m_s}{\rho_p V_f - (m_s - m_f)} \quad (\text{Ec.2.5})$$

### 2.4.2 Densidad del lecho

También denominada densidad total, [11] y representa la densidad aparente del lecho de partículas expresada en la relación masa del sólido por volumen total del lecho. El ensayo ASTM D 2854-96 permite estimar este valor basado en la siguiente expresión:

$$\rho_L = \frac{m_L}{V_L} \quad (\text{Ec.2.6})$$

donde  $\rho_L$  (g/ml) es la densidad aparente del lecho de partículas,  $m_L$  es la masa de las partículas en g, y  $V_L$  es el volumen del lecho en ml.

### 2.4.3 Porosidad

Si se indica de manera sistemática el volumen ( $V_L$ ) de una masa de partículas, se tendrá que un cierto volumen estará ocupado por el sólido, otro por el agua (la humedad en la partícula) y un tercer volumen por aire. De esto se obtiene que:

$$V_L = V_s + V_w + V_a \quad (\text{Ec.2.7})$$

donde  $V_a$  es el volumen de la fase gaseosa de la muestra [ $\text{cm}^3$ ] y  $V_w$  el volumen de la fase acuosa ligada a las partículas [ $\text{cm}^3$ ].

Ahora, considerando que  $V_w + V_a$  es igual al volumen de los espacios vacíos  $V_v$  se tiene:

$$V_L = V_s + V_v \quad (\text{Ec.2.8})$$

La relación entre el volumen de los espacios vacíos y el volumen total del lecho de partículas, es lo que se conoce como porosidad del lecho, y se designa con la letra  $\varepsilon$ . Se expresa por medio de la siguiente ecuación:

$$\varepsilon = \frac{V_v}{V_L} = \frac{V_L - V_s}{V_L} = \frac{m_L / \rho_L - m_s / \rho_s}{m_L / \rho_L} \quad (\text{Ec.2.9})$$

#### 2.4.4 Granulometría

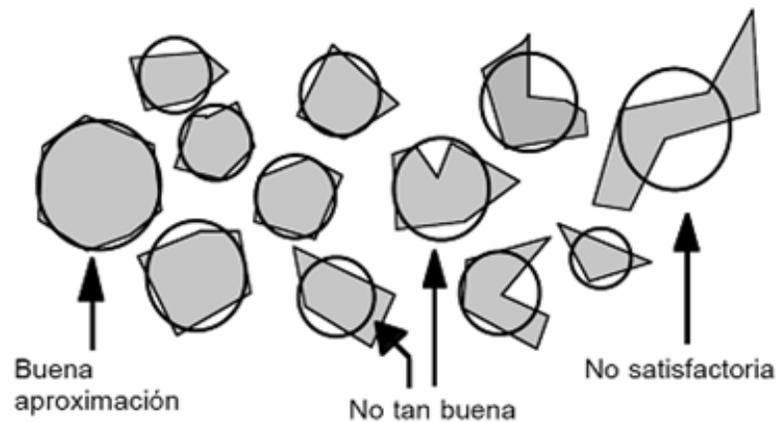
La granulometría, derivada de la palabra "gránulo" (que significa pequeño grano), trata de los métodos de medición del tamaño de un grano y por extensión de una población de granos. Se entiende por "grano", en sentido general, a un trozo de materia sólida o líquida, esférica o no, que se encuentre en un fluido inmisible. Un "grano" puede ser no solamente un grano de arena o de polvo, sino también una gota en una emulsión o un aerosol, una partícula sólida de ceniza en un humo, una burbuja de gas en una espuma, etc.[12]

Se entiende por tamaño, una dimensión característica del grano, en general una longitud. Si se trata de un grano esférico, se tomará evidentemente como dimensión de su tamaño su radio o su diámetro. Para una partícula fuertemente irregular, es a

veces difícil definir un tamaño equivalente que sea satisfactorio desde el punto de vista físico.

El propósito del análisis grano a grano es atribuir un tamaño a cada grano, lo cual es en general un diámetro o un diámetro equivalente. Si se trata de una partícula no esférica, se toma a menudo como “diámetro equivalente”, el diámetro de la esfera del mismo volumen que la partícula. Otra escogencia es el diámetro del círculo de la misma área, que la proyección de la imagen de la partícula sobre el medio registrador (foto, pantalla). Estas son las escogencias clásicas de los métodos que usan aparatos basados sobre fenómenos físicos, ópticos o eléctricos, las cuales dan resultados satisfactorios en casos de granos casi esféricos. Sin embargo, no es siempre el caso como se puede ver en la figura 2.1.

En caso extremo como por ejemplo en el análisis de pulpa de papel, se debe atribuir un tamaño a las fibras de celulosa, las cuales se presentan en general como una figura geométrica alargada y a veces torcida. La lógica implica medir no uno sino dos tamaños, correspondiendo por ejemplo a las dimensiones axial y transversal, o a una dimensión de longitud acompañada de un parámetro de alargamiento o de elipsicidad.[12]



**Figura 2.1 El concepto de diámetro equivalente es una aproximación, no siempre satisfactoria.[12]**

## **2.5 Contacto trifásico involucrando un sólido**

Cuando un sólido está en contacto con dos fluidos, bien sea un líquido y un gas, o bien sea dos líquidos inmiscibles. En todos casos se puede definir tal caso como un contacto  $S + L + F$  donde  $S$  representa el sólido,  $L$  el líquido y  $F$  la tercera fase que es un fluido condensado (líquido) o no (gas). [13]

### **2.5.1 Equilibrio y ángulo de contacto**

Cuando se coloca una gota del líquido  $L$  sobre la superficie del sólido  $S$ , siendo el sistema sumergido en el fluido  $F$ , la gota se extiende hasta tanto el contacto trifásico presenta un equilibrio. El símbolo  $\gamma$  representa la energía libre interfacial

por unidad de área y está seguido por los dos índices de las fases correspondiente. En presencia de tres fases inmiscibles existe una línea de contacto trifásico; a lo largo de esta línea de contacto las tensiones ejercen fuerzas perpendicularmente a la línea de contacto y tangentes a las interfaces correspondientes. El equilibrio se expresa por lo tanto como un balance vectorial en un plano perpendicular a la línea, lo que se ve en la figura 2.2. [13]

Para evitar complicaciones inútiles, se supone que la superficie sólida es plana. Esto puede siempre suponerse en la cercanía del punto de contacto trifásico, con excepción del caso de un medio poroso. Con esta suposición el ángulo  $\theta_s$  es de  $180^\circ$  y las tensiones  $\gamma_{SF}$  y  $\gamma_{LS}$  son vectores que apuntan en direcciones opuestas.

Proyectando los tres vectores sobre la superficie plana del sólido, se obtiene una fuerza neta horizontal nula cuando se cumple la ecuación de Neuman: [13]

$$\gamma_{SF} = \gamma_{LS} + \gamma_{FL} \cos(\theta) \quad (\text{Ec. 2.10})$$



**Figura 2.2. Contacto trifásico sólido-líquido-fluido. [13]**

$\theta_L$  es el ángulo de contacto entre el líquido L y el sólido S, el cual se denomina a veces  $\theta_{LS}$ . En cuanto a  $\theta_F$  ó  $\theta_{FS}$  es el ángulo de contacto entre el fluido F y el sólido S.

### 2.5.2 Consideraciones energéticas.

En la relación anterior, la energía libre interfacial por unidad de área entre las fases L y F corresponde a la tensión superficial o interfacial, y se puede medir por varios métodos. Las dos otras superficies involucran un sólido y por lo tanto no se pueden medir sus tensiones interfaciales, pero se pueden relacionar con el trabajo de adhesión.

El trabajo de adhesión se define como el trabajo para separar una unidad de área de dos fases. En el caso real, al separar una unidad de área entre por ejemplo S y L, se formarán dos nuevas superficies S/F y L/F, y el trabajo de adhesión en el cambio estará dado por la ecuación de Dupré: [13]

$$W_{SL} = \gamma_{SF} + \gamma_{LF} - \gamma_{LS} \quad (\text{Ec. 2.11})$$

Al sustituir el término  $\gamma_{SF} - \gamma_{LS}$  de la ecuación de Neuman se obtiene la ecuación de Young:

$$W_{SL} = \gamma_{FL} (1 + \cos \theta_L) \quad (\text{Ec. 2.12})$$

El trabajo de adhesión de una sustancia con si misma se llama el trabajo de cohesión; para el líquido L se notará  $W_{LL}$  y al separarse una unidad de área en el fluido F tendrá el valor: [13]

$$W_{LL} = 2 \gamma_{LF} \quad (\text{Ec. 2.13})$$

La diferencia entre el trabajo de adhesión del líquido con el sólido y del trabajo de cohesión del líquido se llama el coeficiente de expansión del líquido sobre el sólido  $S_{L/S}$ : [13]

$$S_{L/S} = W_{SL} - W_{LL}$$

$$S_{L/S} = \gamma_{SF} - \gamma_{LS} - \gamma_{LF} \quad (\text{Ec. 2.14})$$

### 2.5.3 Expansión y mojabilidad.

Si la ecuación de Neuman no puede satisfacerse con ningún valor de  $\theta_L$ , es decir si el término  $\gamma_{SF}$  predomina y el ángulo de contacto  $\theta_L$  se torna cero, como consecuencia, el líquido L se expande sobre la superficie. Para un área  $dA$  de expansión, el cambio de superficie SF por superficie SL, el cambio energético debe ser menor que cero. Reemplazándose un área de  $dA$  con energía  $\gamma_{SF}$  por dos áreas  $dA$  con energía acumulada menor  $\gamma_{LF} + \gamma_{SL}$ . En este caso el coeficiente de expansión es positivo y se dice que la superficie es perfectamente mojada por el líquido. Si el coeficiente de expansión es negativo, la ecuación de Neuman tiene una solución, la cual se calcula por: [13]

$$1 - \cos \gamma_L = - (S_{L/S}) / \gamma_{FL} \quad (\text{Ec.2.15})$$

#### 2.5.4 Influencia de los surfactantes.

En el caso de un contacto sólido (S), líquido (L) y gas (F) con un surfactante susceptible de adsorberse solamente en la interfase FL, la presencia de surfactante reduce  $\gamma_{FL}$  y por lo tanto aumenta el coeficiente de expansión.

Si este coeficiente es negativo, el ángulo de contacto  $\theta_L$  disminuye y para un cierto valor crítico  $\gamma_c$  de la tensión  $\gamma_{FL}$ , se torna cero, y el sólido se vuelve mojable por el líquido.

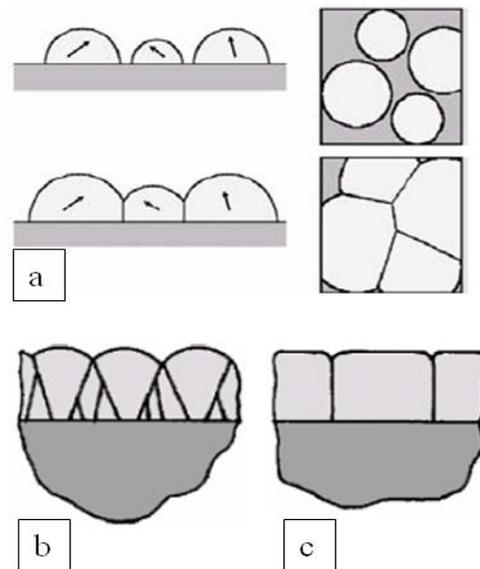
Se obtiene este valor crítico graficando  $\cos \theta_L$  en función de  $\gamma_{FL}$  (el gráfico es a menudo lineal) y extrapolando a  $\cos \theta_L = 1$ . Para superficie de baja energía  $\gamma_c$  es el orden de 30 dina/cm (polietileno) ó 18 dina/cm (teflón). Cuando el surfactante decrece significativamente la tensión  $\gamma_{FL}$  sin afectar la energía  $\gamma_{LS}$ , se produce una reducción de  $\theta_L$ , es decir un aumento de mojabilidad.

Si el surfactante afecta a la vez  $\gamma_{FL}$  y  $\gamma_{LS}$  el efecto depende del caso. Por ejemplo, cuando un surfactante catiónico en solución acuosa se adsorbe sobre una superficie cargada negativamente por efecto de intercambio iónico, el surfactante tiene su cola hacia L lo que produce un aumento de  $\gamma_{LS}$  y una disminución del

coeficiente de expansión. Tales casos corresponden a las aplicaciones de hidrofobación de rocas o de flotación de minerales. [13]

### **2.5.5 Crecimiento de película.**

La mayoría de las películas crece a través de un proceso en el que núcleos aislados posados sobre un substrato, crecen al chocar y unirse para formar las películas continuas. Este tipo de crecimiento es conocido como el mecanismo de Volmer-Weber para el crecimiento de película. En todos los casos, las propiedades de las películas son fuertemente afectadas por los mecanismos fundamentales de formación; la nucleación, el crecimiento, y unión, así como el post-unión de película espesada, proceso que se observa en la figura 2.3.

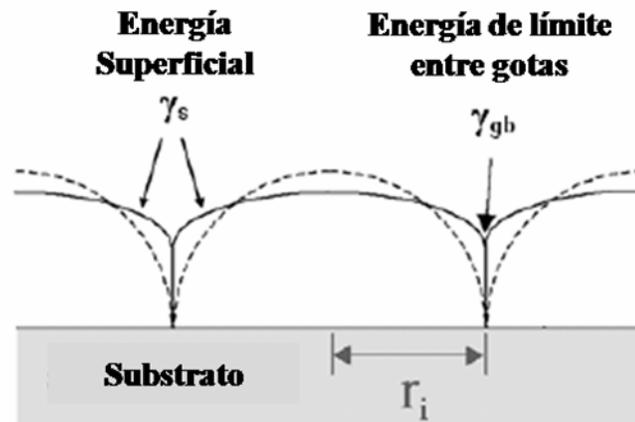


**Figura 2.3. Formación de película por crecimiento de islas según Volmer-Weber. (a) nucleación y crecimiento de islas; (b) aglomeración y contacto de islas adyacentes; (c) formación de películas. [14]**

### 2.5.5.1 Esfuerzos tensores por contacto

Se ha demostrado a través de la microscopía en varias fases de crecimiento, que el desarrollo de un esfuerzo de tensión está asociado con el proceso de unión de isla, con el esfuerzo tensor máximo correspondiente a la realización del proceso de la unión. La tensión de la unión se ha atribuido a la formación de límites de gota durante la unión. Se ha sostenido que cuando las islas entran en el contacto, la formación del límite puede ocurrir a través de un “rápido” proceso como el presentado en la figura 3.4, en que las superficies libres de las dos islas son reemplazadas por un límite de gota a través de una distorsión elástica de las dos islas. La energía ganada a través de

este proceso, es equilibrada por la energía de tensión tensor resultante a través de una minimización de energía global.



**Figura 2.4 Contacto entre gotas adyacentes. [14]**

El origen de la pre-unión y tensión de compresión de post-unión observado en los materiales de alta movilidad está menos claro. Se ha propuesto que la tensión de la pre-unión está asociada con el efecto Laplace-Young, según el cual muchas islas pequeñas, presentan una gran superficie respecto a la proporción de volumen, lo que corresponde a altas presiones, por lo que una forma de reducir la presión es aumentando el diámetro de las gotas y reduciendo el ángulo de contacto. [14]

## 2.6 Flujo a través de lechos empacados

Un sistema de considerable importancia en ingeniería química y en otros campos de proceso es el lecho empacado o la columna empacada que se usa para un

reactor catalítico de lecho fijo, para adsorción de un soluto, absorción simple, lecho de filtración, etc. El material que se empaca en el lecho puede consistir en esferas, partículas irregulares, cilindros o varios tipos de empaques comerciales.

En el análisis de estos sistemas se supone que el empaquetamiento es uniforme en todos lados y que, si acaso hay canalización, éste es mínimo. La razón entre el diámetro de la torre y el diámetro del empaque debe ser de un mínimo de 8:1 a 10:1 para que los efectos de las paredes sea despreciable.[15]

Los métodos de correlación más comunes para relacionar la caída de presión a través de un lecho de partículas se basan en estimar la fricción total del fluido sobre las superficies sólidas que forman los canales tortuosos del lecho. Se supone que los canales pueden considerarse un conjunto de conductos idénticos y paralelos, cada uno de ellos con sección transversal variable. También se asume que el radio hidráulico medio de los canales es apropiado para tener en cuenta la variación de la sección transversal y forma del canal, y que la fricción total por unidad de área de la pared del canal es igual a la suma de dos tipos de fuerzas, las viscosas y las inerciales. La simplificación excesiva en vista de la complejidad de los fenómenos que intervienen en la fricción, precisa comprobar con experimentación, la forma final de la expresión que se obtenida.[16]

### **2.6.1.1 Flujo laminar en lechos empacados**

En las deducciones del flujo se usan ciertas relaciones geométricas para las partículas del lecho. La superficie específica de una partícula " $a_v$ " (1/m) se define como:[15]

$$a_v = \frac{S_p}{v_p} \quad (\text{Ec.2.16})$$

donde  $S_p$  es el área superficial de una partícula en  $\text{m}^2$  y  $v_p$  es el volumen de una partícula en  $\text{m}^3$ . Para una partícula esférica.

$$a_v = \frac{6}{D_p} \quad (\text{Ec.2.17})$$

donde  $D_p$  es el diámetro en m. Para un lecho empacado de partículas que no son esféricas. Puesto que  $(1 - \varepsilon)$  es la fracción de volumen de las partículas del lecho está dado por:

$$a_v = a(1 - \varepsilon) = \frac{6}{D_p}(1 - \varepsilon) \quad (\text{Ec.2.18})$$

donde “ $a$ ” es la razón entre el área superficial total del lecho y el volumen total del lecho (volumen vacío más volumen de partículas).

La velocidad intersticial promedio en el lecho es  $v$  m/s y se relaciona con la velocidad superficial  $v_0$ , basada en el corte transversal del recipiente vacío, por medio de:[16]

$$v_0 = \varepsilon v \quad (\text{Ec.2.19})$$

El radio hidráulico  $R_h$  para el flujo se define como:

$$Rh = \frac{\varepsilon}{a} \quad (\text{Ec.2.20})$$

Al combinar las ecuaciones se obtiene:

$$Rh = \frac{\varepsilon}{6(1-\varepsilon)} D_p \quad (\text{Ec.2.21})$$

Puesto que el diámetro equivalente D para un canal es  $D = 4Rh$ , el número de Reynolds para un lecho empacado es, según la ecuación anterior y  $v_0 = \varepsilon v$ , se tiene que:

$$\text{Re} = \frac{(4Rh)v\rho}{\mu} = \frac{4}{6(1-\varepsilon)} \frac{D_p v_0 \rho}{\mu} \quad (\text{Ec.2.22})$$

Para lechos empacados, Ergun define el número de Reynolds como se acaba de mostrar, pero sin el término 4/6, así:

$$\text{Re} = \frac{D_p v_0 \rho}{\mu(1-\varepsilon)} \quad (\text{Ec.2.23})$$

Para el flujo laminar, la ecuación de Hagen-Poiseuille puede combinarse con la ecuación (2.21) para Rh y la ecuación (2.19) para dar la siguiente expresión:

$$\Delta p = \frac{32\mu v \Delta L}{D^2} = \frac{32\mu(v_0/\varepsilon)\Delta L}{(4Rh)^2} = \frac{72\mu v_0 \Delta L(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3 D_p^2} \quad (\text{Ec.2.24})$$

El verdadero  $\Delta L$  es más largo debido a la trayectoria tortuosa y el uso del radio hidráulico predice una  $v_0$  demasiado grande. Los datos experimentales muestran que la constante debe ser 150, que da la ecuación de Blake-Kozeny para el flujo laminar, las fracciones de vacío de menos de 0.5, el diámetro de partícula efectivo  $D_p$  y  $Re < 10$ . La caída de presión se estima por:

$$\Delta p = \frac{150\mu v_0 \Delta L(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3 D_p^2} \quad (\text{Ec.2.25})$$

### 2.6.1.2. Flujo turbulento en lechos empacados

Para el flujo turbulento se usa el mismo procedimiento, sustituyendo las ecuaciones para obtener la caída de presión en el lecho, dada por:

$$\Delta p = \frac{3f\rho v_0^2 \Delta L(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3 D_p} \quad (\text{Ec.2.26})$$

Para el flujo sumamente turbulento, el factor de fricción puede aproximarse a un valor constante. Además, se supone que todos los lechos empacados deben tener la misma rugosidad relativa. Los datos experimentales indican que  $3f = 1,75$ . Por consiguiente, la ecuación final para el flujo turbulento para,  $Re > 1000$ , que se llama ecuación de Burke-Plummer, se convierte en:

$$\Delta p = \frac{1,75\rho v_0^2 \Delta L(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3 D_p} \quad (\text{Ec.2.27})$$

Al sumar la ecuación para flujo laminar y la ecuación para flujo turbulento, Ergun propuso la siguiente ecuación general para números de Reynolds bajos, intermedios y altos que se ha verificado experimentalmente, dada por:

$$\Delta p = \frac{150\mu v_0 \Delta L(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3 D_p^2} + \frac{1,75\rho v_0^2 \Delta L(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3 D_p} \quad (\text{Ec.2.28})$$

### 2.6.1.3. Ley de Darcy

Para describir la lenta filtración de un fluido a través de los medio granulares, Henri Darcy propuso empíricamente la siguiente ecuación:[18]

$$v_0 = \frac{Q}{A} - \left( \frac{\kappa \Delta p}{\mu \Delta L} \right) \quad (\text{Ec.2.29})$$

La velocidad  $v_0$  en esta ecuación es la velocidad superficial, que se define como el caudal volumétrico a través de una unidad de área de sección transversal al sólido más el fluido, promediada sobre una pequeña región del espacio, pequeña respecto a las dimensiones microscópicas del flujo, pero grande respecto al tamaño del poro. Es el gasto en  $\text{cm}^3/\text{s}$ ,  $A$  es el corte transversal vacío en  $\text{cm}^2$ ,  $\mu$  es la viscosidad en cp,  $\Delta p$  es la caída de presión en atm,  $\Delta L$  es la longitud en cm y  $\kappa$  es la permeabilidad del

medio poroso en (flujo en cm<sup>3</sup>/s)(cp) (longitud en cm) (caída de presión en atm)/(área en cm<sup>2</sup>). Las unidades de (cm<sup>2</sup>cp atm)/s usadas para  $\kappa$  con frecuencia son en Darcys o en miliDarcys (1/1000 Darcy). Por tanto, si un medio poroso tiene una permeabilidad de 1 darcy, un fluido con viscosidad de 1 cp fluirá a 1 cm<sup>3</sup>/s por un corte transversal de 1 cm<sup>2</sup> con un  $\Delta p$  de 1 atm por centímetro de longitud.[15]

#### 2.6.1.4. Factores de forma

En los lechos empacados, muchas partículas suelen tener forma irregular. El diámetro equivalente de una partícula se define como el diámetro de una esfera que tuviera el mismo volumen que esa partícula. El factor de esfericidad  $\phi_s$  de una partícula es la razón entre el área superficial de esa esfera (que tiene el mismo volumen que la partícula) y el área superficial real de la partícula. Para una esfera, el área superficial es  $S_p = \pi D_p^2$  y el volumen está dado por  $v_p = \pi D_p^3/6$ . Por consiguiente, para toda partícula,  $\phi_s = \pi D_p^2/S_p$ , donde  $S_p$  es el área superficial real de la partícula y  $D_p$  es el diámetro (diámetro equivalente) de la esfera que tiene el mismo volumen que la partícula. Entonces,

$$\frac{S_p}{v_p} = \frac{\pi D_p^2/\phi_s}{\pi D_p^3/6} = \frac{6}{\phi_s D_p} \quad (\text{Ec.2.30})$$

A partir de la ecuación (2.16), se obtiene:

$$a_v = \frac{S_p}{v_p} = \frac{6}{\phi_s D_p} \quad (\text{Ec.2.31})$$

Entonces la ecuación (2.31) se transforma en:

$$a_v = \frac{6}{\phi_s D_p} (1 - \varepsilon) \quad (\text{Ec.2.32})$$

Los valores de  $\phi_s$  dependen de la geometría: para una esfera  $\phi_s = 1$ , para un cilindro cuyo diámetro es igual a su longitud  $\phi_s$  es 0,874 y para un cubo  $\phi_s = 0,806$ . En cuanto a los materiales granulares, es difícil medir el volumen y el área superficial real, a fin obtener el diámetro equivalente, así que  $D_p$  generalmente se toma como el tamaño nominal obtenido en un análisis por mallas (tamices) o en mediciones visuales de longitud. El área superficial está determinada por las mediciones de adsorción o por mediciones de la caída de presión en un lecho de partículas. Los valores más comunes para muchos materiales triturados se encuentran entre 0,6 y 0,7. Para el cilindro y el cubo, en ocasiones se usa por conveniencia el diámetro nominal (en vez del diámetro equivalente), lo que da un factor de forma de 1.0.

### 2.6.1.5 Mezclas de partículas

Para las mezclas de partículas de varios tamaños, la superficie específica media  $a_{vm}$  se define como:

$$a_{vm} = \sum x_i a_{vi} \quad (\text{Ec.2.33})$$

donde  $x_i$  es la fracción, combinando las expresiones se tiene la siguiente expresión:

$$D_{pm} = \frac{6}{a_{vm}} = \frac{6}{\sum x_i (6/\phi_s D_{pi})} = \frac{1}{\sum x_i / (\phi_s D_{pi})} \quad (\text{Ec.3.34})$$

donde  $D_{pm}$  es el diámetro medio efectivo de la partícula.

### 2.6.2. Diseño de lechos empacados

Un método muy usado para la adsorción de solutos de líquidos en un lecho fijo de partículas granulares, es el descenso del fluido a través del lecho empacado a una tasa de flujo constante. La situación es más compleja que la de un simple proceso por lotes en un tanque agitado que alcanza el equilibrio.

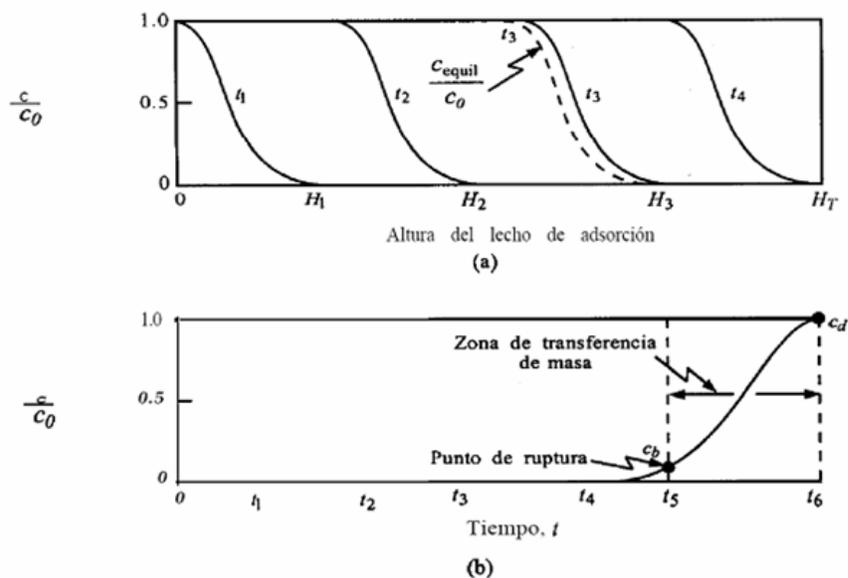


Figura 2.5 Perfiles de concentración para adsorción en un lecho fijo:

**(a) a varias posiciones y tiempos en el lecho, (b) a la salida del lecho.**

En el proceso de lecho fijo son importantes las resistencias a la transferencia de masa, y el proceso se lleva a cabo en estado no estacionario. La eficiencia del proceso depende de la dinámica global del sistema, y no sólo de las consideraciones de equilibrio. Las concentraciones del soluto en la fase fluida y en la fase adsorbente sólida cambian con el tiempo y también con la posición en el lecho fijo conforme prosigue la adsorción. En la entrada del lecho se supone que el sólido no tiene soluto al principio del proceso; a medida que el fluido entra en contacto con la entrada del lecho, se realiza la mayor parte de la transferencia de masa y de la adsorción.

Cuando el fluido pasa a través del lecho, su concentración va disminuyendo muy rápidamente con la distancia hasta llegar a cero mucho antes del final del lecho. El perfil de concentración al principio, en el tiempo  $t_1$ , se muestra en la figura 2.5, donde la relación de concentraciones  $c/c_0$  se grafica en función de la longitud del lecho. La concentración del fluido  $c_0$  es la de la alimentación y  $c$  es la concentración del fluido en un punto del lecho.

Después de cierto tiempo, el sólido que se encuentra cerca de la entrada de la columna está casi saturado, y la mayor parte de la transferencia de masa y de la adsorción sucede ahora en un punto ligeramente más lejano que la entrada. En un tiempo posterior  $t_2$ , el perfil o la zona de transferencia de masa donde ocurre la mayor parte del cambio de la concentración, se ha desplazado más lejos dentro del lecho.

Los perfiles de concentración que se muestran corresponden a la fase fluida. Los perfiles de concentración para la concentración de adsorbatos en el sólido son

similares. En la entrada, el sólido está casi saturado y su concentración permanece casi constante hasta la zona de transferencia de masa, donde desciende rápidamente hasta casi cero. La línea punteada correspondiente al tiempo  $t_3$  muestra la concentración en la fase fluida en equilibrio con el sólido. La diferencia de las concentraciones es la fuerza que impulsa la transferencia de masa.[15]

### 2.6.2.1 Concentración de la curva de avance

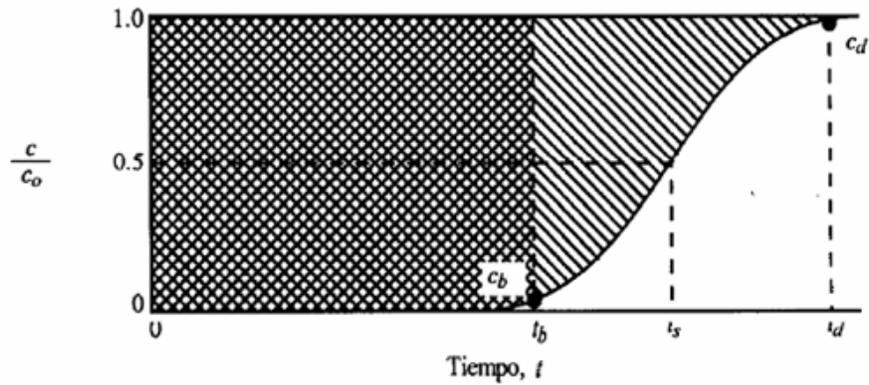
Como se ve en la figura 2.5, la mayor parte de la adsorción ocurre en cualquier momento en una zona relativamente angosta de adsorción o de transferencia de masa. Mientras la solución continúa fluyendo, esta zona de transferencia de masa, que tiene forma sinusoidal, va bajando por la columna.

En un tiempo dado  $t_3$  cuando casi la mitad del lecho está saturado de soluto, la concentración de salida sigue siendo aproximadamente cero, como se observa en la figura 2.5-b. Esta concentración de salida sigue siendo casi cero hasta que la zona de transferencia de masa empieza a llegar a la salida de la torre en el tiempo  $t$ . Entonces, la concentración de salida empieza a elevarse, y en  $t_5$  llega a  $c_b$ , que se llama punto de ruptura. Después de que se alcanza el punto de ruptura, la concentración  $c$  se eleva muy rápidamente hasta el punto  $c_d$ , que es el final de la curva de avance donde el lecho pierde su efectividad. La concentración de punto de ruptura representa el máximo que se puede descartar y se suele tomar como 0.01 hasta 0.05 para  $c_b/c_0$ . El valor  $c_d$ , se toma como el punto donde  $c_d$  es aproximadamente igual a  $c$ . En una zona angosta de transferencia de masa, la curva de avance es muy marcada y la mayor parte de la capacidad del lecho se ha usado en el punto de ruptura.[15]

### 2.6.2.3 Capacidad de la columna y método de diseño para aumento de escala

El ancho y la forma de la zona de transferencia de masa dependen de la isoterma de adsorción, de la tasa de flujo, de la tasa de transferencia de masa hacia las partículas y de la difusión en los poros. Se han publicado varios métodos teóricos que predicen la zona de transferencia de masa y los perfiles de concentración en el lecho. Los resultados pronosticados pueden ser inexactos a causa de muchas incertidumbres debidas a los patrones de flujo y a las correlaciones para predecir la difusión y la transferencia de masa. Por tanto, se necesita hacer experimentos a escala de laboratorio para determinar los resultados.

Se puede demostrar que la capacidad total o estequiométrica del lecho empacado, cuando el lecho completo alcanza el equilibrio con la alimentación, es proporcional al área entre la curva y una línea en  $c/c_0 = 1$ . Como se muestra en la figura 2.6. El área total sombreada representa la capacidad total o estequiométrica del lecho expresada por: [15]



**Figura 2.6 Determinación de la capacidad de una columna a partir de la curva de avance.[16]**

$$t_t = \int_0^{\infty} \left(1 - \frac{c}{c_0}\right) dt \quad (\text{Ec.2.35})$$

donde  $t_t$  es el tiempo equivalente a la capacidad total o estequiométrica. La capacidad utilizable del lecho hasta el tiempo de punto de ruptura  $t_b$ , es el área cuadrículada.

$$t_t = \int_0^{t_b} \left(1 - \frac{c}{c_0}\right) dt \quad (\text{Ec.2.36})$$

siendo  $t_u$  el tiempo equivalente a la capacidad utilizable o el tiempo en el cual la concentración del efluente alcanza su máximo nivel permisible. El valor de  $t_u$  suele ser muy cercano al de  $t_b$ .

La relación  $t_u/t_t$  es la fracción de la capacidad o longitud total del lecho utilizada hasta el punto de ruptura. Así, para una longitud total del lecho de  $H_T$  en m,  $H_B$  es la longitud del lecho utilizada hasta el punto de ruptura, la cual está dada por:

$$H_B = \frac{t_u}{t_t} H_T \quad (\text{Ec.2.37})$$

Este procedimiento de diseño se usa con mucha frecuencia y su validez depende de que las condiciones en la columna de laboratorio sean semejantes a las de la unidad a escala real. La unidad de diámetro pequeño debe estar bien aislada para parecerse a la torre de diámetro grande, que trabaja adiabáticamente. La velocidad de masa en ambas unidades debe ser igual y el lecho debe tener la longitud suficiente para contener una zona de transferencia de masa en estado estacionario (L). La dispersión axial o la mezcla axial pueden no ser exactamente iguales en las dos torres, pero con el cuidado necesario, este método de diseño es muy útil.[15]

## **CAPITULO III**

### **METODOLOGÍA**

#### **3.1 Caracterización de las partículas de bagazo de caña**

Se realizaron análisis físicos a las partículas de bagazo de caña, descartando el material fibroso y las cortezas de una muestra de bagazo tratado para almacenamiento. Previo a la hidrofobación de las partículas, se procedió al análisis granulométrico (ASTM- E11), en base al cual se seleccionaron las 4 fracciones granulométricas de trabajo. A continuación se aplicaron las siguientes pruebas:

Densidad del lecho mediante la norma ASTM D 2854-96.

Densidad de materiales con alta porosidad: método propuesto por Venegas.[10]

Morfología del material, empleando registro micrográfico.

##### **3.1.1 Análisis granulométrico (ASTM-E11)**

Esta prueba tiene por objeto determinar las fracciones de los diferentes diámetros promedios de grano presentes en la muestra de bagazo. El tamizado se

realizó con una serie de tamices estándares, ASTM 10 (2000  $\mu\text{m}$ ), ASTM 12 (1651  $\mu\text{m}$ ), ASTM 20 (850  $\mu\text{m}$ ), ASTM 30 (589  $\mu\text{m}$ ), ASTM 40 (425  $\mu\text{m}$ ), ASTM 60 (246  $\mu\text{m}$ ) y ASTM 80 (180  $\mu\text{m}$ ); una balanza electrónica *Symmetry* Cole-Parmer y un vibrador mecánico de tamices como se muestra en la figura 3.1.



**Figura 3.1 Materiales y equipos para análisis granulométrico:**

**(a) batería de tamices y vibrador mecánico, (b) balanza analítica.**

Preseleccionando manualmente aquellas partículas que pasaban por el tamiz 10, se pesaron cuatro muestras de bagazo, entre 44 g y 77 g. Luego se incorporó cada muestra al arreglo de tamices dispuestos en orden ascendente de menor a mayor abertura, una vez sellado el arreglo se hizo pasar el granulado a través de los tamices por medio de agitación mecánica durante 15 min, para luego pesar el material recuperado de cada tamiz. La tabla 3.1 muestra los datos recabados para cada prueba.

**Tabla 0.1 Datos de análisis granulométrico.**

N° Tamiz	Abertura (mm)	Masa retenida en el tamiz (g)			
		Ensayo	Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3
ASTM 12	1.651	16,1174	9,4900	12,4173	10,4707
ASTM 20	850	22,5006	16,0216	21,0977	13,4072
ASTM 30	589	15,2811	11,5717	12,5415	8,5933
ASTM 40	425	8,5884	9,7177	10,416	7,1184
ASTM 60	246	5,1858	3,0334	4,9494	2,0897
ASTM 80	180	8,5959	4,2556	3,0089	2,0724
Pasa 80	-	0,8862	0,7071	0,8267	0,3622
	<b>Masa total (g)</b>	77,1554	54,7971	65,2575	44,1139

Para calcular la fracción retenida en cada tamiz ( $x_i$ ), se obtuvo la razón entre  $m_i$  el peso retenido por cada uno y  $m_t$  la masa total de la muestra, como lo presenta la ecuación 3.1.

$$x_i = m_i / m_t \quad (\text{Ec. 3.1})$$

Leyendo los datos de la tabla 3.1 para la abertura de 1651 mm se tiene:

$$x_i = 16,1174 \text{ g} / 77,1554 \text{ g}$$

$$x_i = 0,20889\%$$

Los resultados se compilaron en la tabla 3.2. Para estos se asignó el diámetro promedio de partícula como el tamaño de apertura promedio entre el tamiz y su

inmediato superior en el arreglo; en el caso del ASTM 12 se empleó el tamiz estándar más próximo, proponiendo la ecuación 3.2.

$$\bar{D}_i = \frac{D_0 + D_s}{2} \quad (\text{Ec. 3.2})$$

donde  $\bar{D}_i$  es el diámetro de partícula retenida en el tamiz,  $D_0$  la abertura del tamiz retentor y  $D_s$  la abertura del tamiz inmediato superior en el arreglo, todos expresados en mm. Sustituyendo para cada tamiz de la batería se tiene:

$$\bar{D}_{ASTM10} = \frac{(2.000 + 1.651)mm}{2}$$

$$\bar{D}_{ASTM10} = 1.826mm$$

**Tabla 0.2 Porcentaje másico de partículas de bagazo de caña.**

N° Tamiz	Diámetro promedio (mm)	Porcentaje másico (% m/m)			
		Ensayo	Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3
ASTM 12	1.826	20,89	17,32	19,03	23,74
ASTM 23	1.251	29,16	29,24	32,33	30,39
ASTM 30	720	19,81	21,12	19,22	19,48
ASTM 40	507	11,13	17,73	15,96	16,14
ASTM 60	336	6,72	5,54	7,58	4,74
ASTM 80	213	11,14	7,77	4,61	4,70
Pasa 80	180	1,15	1,29	1,27	0,82

<b>Total (%)</b>	100,00	100,00	100,00	100,00
------------------	--------	--------	--------	--------

En este proceso, fueron descartadas las fracciones retenidas en los tamices ASTM 10 y ASTMA 12, debido a su gran tamaño y morfología diversa, impráctica para los ensayos subsiguientes.

### **3.1.2. Preparación e hidrofobación de las partículas**

El proceso contó con cuatro fases: selección de partícula según su diámetro promedio, lavado del bagazo, secado e hidrofobación.

Se seleccionaron las fracciones granulométricas retenidas por los tamices ASTM 20, ASTM 30 y las correspondientes a la combinación del ASTM 40 junto con ASTM 60, y al ASTM 80 con bandeja; el diámetro de partícula para las combinaciones se obtuvo como la suma de los productos entre el diámetro promedio calculado y su composición másica en la combinación. Cada fracción se separó y etiquetó en contenedores.

El lavado de cada fracción se efectuó por medio de dos mecanismos: se inicio con un lavado mecánico, agitando en un recipiente el bagazo con un volumen igual de agua corriente, luego se procedió a filtrar y prensar manualmente las partículas, repitiendo 6 veces más el procedimiento. A continuación se introdujeron en un recipiente Pyrex de 1.000 ml con toma lateral, sellándolo luego con un cedazo de tela sintética, conectando la toma lateral con el grifo se hizo pasar una corriente de a agua

a través de las partículas durante 4 h, recuperando las partículas mediante filtrado y prensado manual; los materiales se presentan en la imagen (a) de la figura 3.2.

Las muestras (de 250 a 200 g) se llevaron a secado en bandejas circulares de aluminio, en una estufa *Thelco* modelo 18 a 100 °C, durante 45 min (figura 3.2. b).

La hidrofobación se realizó de forma individual, preparando gramo a gramo cada una de las formulaciones a estudiar (0, 30, 40, 50 y 60 % m/m de parafina). Con una espátula se llevó a pesada la masa requerida de parafina sobre vidrio de reloj, utilizando una balanza electrónica Cole-Parmer modelo *Symmetry* de apreciación  $\pm 0,0001\text{g}$ ; la parafina se fundió sobre una plancha Ika C-MAG HS 7 en bandeja de aluminio a 85 °C; una vez fundida se mezcló con la masa de bagazo de granulometría correspondiente, completando así 1 g de fórmula. Los materiales y equipos se muestran en la figura 3.2.c.



**Figura 3.2 Equipos y materiales para la preparación de partículas: (a) recipientes de lavado; (b) estufa y bandeja; (c) materiales, sustancias y equipos para la hidrofobación.**

### **3.1.2 Densidad del lecho mediante la norma ASTM D 2854-96**

Teniendo en cuenta la cantidad limitada de muestra, el ensayo se adaptó empleando cilindros graduados de 10 ml; aplicándose a cada formulación dos repeticiones, a fin de hallar el valor promedio para la densidad del lecho (g/ml). Los materiales y equipos utilizados se muestran en la figura 3.3, procediéndose de la siguiente forma:

- a. Tarar la balanza con el cilindro Kimax de 10 ml con apreciación de  $\pm 0,1$  ml.
- b. Incorporar al cilindro entre 3 y 4 ml de muestra con el dispensador de sólidos Sytron.
- c. Medir el peso del lecho.



**Figura 3.3 Materiales y equipos para el ensayo de densidad:**

**(a) balanza analítica y cilindro graduado, (b) dispensador de sólidos.**

Los datos obtenidos en la pruebas de densidad de lecho se presentan en la tabla 3.3, donde  $V_1$  es el volumen de lecho medido en ml y  $M_1$  (g) la masa correspondiente.

**Tabla 0.3 Volúmenes y masas de lecho medidos para las formulaciones preparadas.**

Diámetro promedio de partícula ( $\mu\text{m}$ )		Contenido de parafina (% m/m)								
		0%			30%			40%		
1251	$V_1$ (ml)	4,8	5,6	5,8	5,6	6,6	6,8	4,4	3,4	2,8
	$M_1$ (g)	0,279	0,2963	0,3379	0,4224	0,5425	0,4972	0,372	0,3205	0,2742
720	$M_1$ (g)	4	5	3,8	4,6	5,2	4,4	5,6	4,4	4,8
	$V_1$ (ml)	0,2661	0,3298	0,2544	0,4229	0,4215	0,4058	0,544	0,4363	0,5515
457	$V_1$ (ml)	2,8	2,8	3	2,8	3	4,8	2,8	3	3,4
	$M_1$ (g)	0,1664	0,1715	0,184	0,2426	0,2893	0,4039	0,2957	0,3096	0,3532
208	$V_1$ (ml)	2	3,6	2,6	2,4	2,6	2,4	2,2	2,4	2,4
	$M_1$ (g)	0,1305	0,2258	0,1655	0,2041	0,2002	0,1856	0,1966	0,2015	0,2172
Diámetro promedio de partícula ( $\mu\text{m}$ )		50%			60%					
1251	$V_1$ (ml)	3,8	4,2	4,6	3	3,4	3,8			
	$M_1$ (g)	0,413	0,4797	0,496	0,4328	0,5427	0,519			
720	$V_1$ (ml)	4,6	3,4	3,5	4	2,4	4			

	M <sub>1</sub> (g)	0,5618	0,414	0,4643	0,5894	0,388	0,5887
457	V <sub>1</sub> (ml)	2,8	2,8	3	2,4	2,4	2
	M <sub>1</sub> (g)	0,3287	0,3189	0,3113	0,3568	0,3307	0,2858
208	V <sub>1</sub> (ml)	2	2,6	2,6	2	2,2	2
	M <sub>1</sub> (g)	0,1908	0,2767	0,2902	0,255	0,2897	0,2668

Empleando los datos de la tabla 3.3 se aplicó la ecuación 2.6 para determinar densidad de lecho:

$$\rho_L = \frac{0,279 \text{ g}}{4,8 \text{ ml}}$$

$$\rho_L = 0,058 \text{ g / ml}$$

Entonces la densidad promedio del lecho es el promedio aritmético, según la ecuación 3.3:

$$\bar{\rho}_L = \sum_{i=1}^n \rho_{Li} / n \quad (\text{Ec. 3.3})$$

$$\bar{\rho}_L = \frac{(0,0581 + 0,0529 + 0,0583) \text{ g / ml}}{3}$$

$$\bar{\rho}_L = 0,0564 \text{ g / ml}$$

Los valores estimados se presentan en las tablas 3.4 y 3.5, respectivamente.

**Tabla 0.4 Valores de densidad de lecho (g/ml) determinadas en ensayo para las formulaciones preparadas.**

Diámetro promedio de partículas ( $\mu\text{m}$ )	Contenido de parafina (% m/m)								
	0%			30%			40%		
1251	0,0581	0,0529	0,0583	0,0754	0,0822	0,0731	0,0845	0,0943	0,0979
720	0,0665	0,0660	0,0669	0,0919	0,0811	0,0922	0,0971	0,0992	0,1149
457	0,0594	0,0613	0,0613	0,0866	0,0964	0,0841	0,1056	0,1032	0,1039
208	0,0653	0,0627	0,0637	0,0850	0,0770	0,0773	0,0894	0,0840	0,0905
Diámetro promedio de partículas ( $\mu\text{m}$ )	50%			60%					
1251	0,1087	0,1142	0,1078	0,1443	0,1596	0,1366			
720	0,1221	0,1218	0,1327	0,1474	0,1617	0,1472			
457	0,1174	0,1139	0,1038	0,1487	0,1378	0,1429			
208	0,0954	0,1064	0,1116	0,1275	0,1317	0,1334			

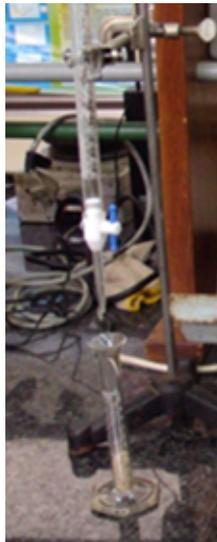
**Tabla 0.5 Valores promedio de densidad de lecho (g/ml) para las diferentes formulaciones preparadas.**

Diámetro promedio de partícula ( $\mu\text{m}$ )	Contenido de parafina (% m/m)				
	0%	30%	40%	50%	60%
1251	0,0564	0,0622	0,0720	0,0769	0,0800
720	0,0665	0,0749	0,0800	0,0884	0,0901
457	0,0607	0,0697	0,0815	0,0891	0,0954
208	0,0639	0,0705	0,0752	0,0798	0,0812

### 3.1.3. Densidad de materiales con alta porosidad: método propuesto por Venegas

Aprovechando los datos y materiales del análisis anterior, se completó el estudio de la porosidad del lecho, determinando la densidad del sólido por desplazamiento de un volumen de hidrocarburo. Para ello se incorporó a la prueba una bureta Pyrex de 50 ml de apreciación  $\pm 0,1$  enrazada con kerosén comercial (figura 3.4), con la cual se efectuaron los siguientes pasos:

- a. Liberar cierto volumen de kerosén dentro del cilindro graduado con la muestra.
- b. Eliminar burbujas de aire atrapadas utilizando vibración.
- c. Medir el volumen final en el cilindro.



**Figura 3.4 Bureta de 50 ml y cilindro graduado con lecho de partículas.**

Los datos recopilados en la prueba se muestran en la tabla 3.6.

Valiéndose de estos datos y la ecuación 2.4 se despejó el volumen real del sólido:

$$V_s = V_f - V_K$$

y sustituyendo en la ecuación 2.9 se tiene:

$$\varepsilon = \frac{V_v}{V_L} = \frac{V_L - V_f + V_K}{V_L} \quad (\text{Ec. 2.9})$$

$$\varepsilon = \frac{(4,6 - 4,4 + 3,5)ml}{4,6ml}$$

$$\varepsilon = 0,8339$$

**Tabla 0.6 Valores de volumen gastados de kerosén  $V_K$  (ml) y volumen final de mezcla  $V_f$  (ml) para ensayos de porosidad.**

Diámetro promedio de partículas ( $\mu\text{m}$ )	$V_f$ (ml)	Contenido de parafina (% m/m)								
		0%			30%			40%		
1251	$V_f$ (ml)	4,8	5,8	5,8	6,0	7,2	7,1	4,8	3,6	2,6

	V <sub>K</sub> (ml)	4,0	5,0	5,0	5,0	6,0	6,0	4,0	3,0	2,0
720	V <sub>f</sub> (ml)	4,3	5,4	4,0	4,4	5,2	4,8	5,8	4,8	5,0
	V <sub>K</sub> (ml)	4,0	4,5	3,5	3,5	4,5	4,0	5,0	4,0	4,0
457	V <sub>f</sub> (ml)	3,8	3,0	3,4	3,4	3,6	5,6	3,6	3,4	3,6
	V <sub>K</sub> (ml)	3,5	2,5	3,0	3,0	3,0	5,0	3,0	3,0	3,0
208	V <sub>f</sub> (ml)	2,2	4,2	3,2	2,2	3,2	2,2	2,4	2,4	2,4
	V <sub>K</sub> (ml)	2,0	4,0	3,0	2,0	3,0	2,0	2,0	2,0	2,0
<b>Diámetro promedio de partículas (µm)</b>		<b>50%</b>				<b>60%</b>				
1251	V <sub>K</sub> (ml)	3,8	4,8	5,0	3,8	3,8	5,0			
	V <sub>f</sub> (ml)	3,0	4,0	4,0	3,0	3,0	4,0			
720	V <sub>K</sub> (ml)	5,0	3,8	4,4	4,8	2,6	5,0			
	V <sub>f</sub> (ml)	4,0	3,0	3,5	4,0	2,0	4,0			
457	V <sub>K</sub> (ml)	2,6	3,6	3,4	2,6	2,6	2,4			
	V <sub>f</sub> (ml)	2,0	3,0	3,0	2,0	2,0	2,0			
208	V <sub>K</sub> (ml)	2,4	3,4	3,4	2,4	2,4	2,4			
	V <sub>f</sub> (ml)	2,0	3,0	3,0	2,0	2,0	2,0			

Los valores estimados de porosidad de lecho se encuentran en la tabla 3.7.

**Tabla 0.7 Valores de porosidad de lecho (g/ml) determinadas en ensayo para las formulaciones preparadas.**

<b>Contenido de parafina (% m/m)</b>
--------------------------------------

Diámetro promedio de partículas (μm)	0%			30%			40%		
	1251	0,8333	0,8571	0,8621	0,8214	0,8182	0,8382	0,8182	0,8235
720	0,9250	0,8200	0,8684	0,8043	0,8654	0,8182	0,8571	0,8182	0,7917
457	0,8929	0,8214	0,8667	0,8571	0,8000	0,8750	0,7857	0,8667	0,8235
208	0,9000	0,9444	0,9231	0,9167	0,9231	0,9167	0,8182	0,8333	0,8333
Diámetro promedio de partículas (μm)	50%			60%					
	1251	0,7895	0,8095	0,7826	0,7333	0,7647	0,7368		
720	0,7826	0,7647	0,7429	0,8000	0,7500	0,7500			
457	0,7857	0,7857	0,8667	0,7500	0,7500	0,8000			
208	0,8000	0,8462	0,8462	0,8000	0,8182	0,8000			

Se tomó el promedio aritmético de los valores anteriores como valor medio de la porosidad, según la ecuación 3.5:

$$\bar{\varepsilon}_L = \sum_{i=1}^n \varepsilon_{Li} / n \quad (\text{Ec. 3.5})$$

$$\bar{\varepsilon}_L = \frac{(0,8214 + 0,8182 + 0,8382)}{3}$$

$$\bar{\varepsilon}_L = 0,8309$$

Los valores estimados se muestran la tabla 3.8.

**Tabla 0.8 Valores promedio de porosidad de lecho (g/ml) para las diferentes formulaciones preparadas.**

Diámetro promedio de partícula (μm)	Contenido de parafina (% m/m)				
	0%	30%	40%	50%	60%
1251	0,8508	0,8469	0,8339	0,8259	0,8249
720	0,8711	0,8309	0,8461	0,8293	0,8469
457	0,8603	0,8484	0,8413	0,8440	0,8202
208	0,9225	0,9281	0,9209	0,9188	0,8860

Los valores estimados de densidad y porosidad de lecho se analizaron estadísticamente haciendo uso de los programas Excel de Microsoft y Statgraphics Plus; con el primero se calcularon las desviaciones estándar para los ensayos, compilándose en la tabla 3.9. Con el programa Statgraphics Plus se realizó el análisis de varianza o ANAVA al 95 % de significancia, generando un reporte estadístico y gráficos de media reportados en las figuras 4.4 y 4.5 del capítulo 4, junto con un reportes de los análisis incluidos en el anexo A (A.1 y A.2).

**Tabla 0.9 Valores de desviación estándar para los ensayos de densidad y porosidad del lecho.**

Diámetro promedio de partículas ( $\mu\text{m}$ )		Contenido de parafina (% m/m)				
		0%	30%	40%	50%	60%
1251	Densidad (g/ml)	0,3050%	0,4719%	0,6916%	0,3467%	1,1730%
	Porosidad	1,5367%	1,0764%	2,0464%	1,3985%	1,7190%
720	Densidad (g/ml)	0,0495%	0,6366%	0,9720%	0,6186%	0,8317%
	Porosidad	5,2553%	3,2003%	3,2935%	1,9908%	2,8868%
457	Densidad (g/ml)	0,1076%	0,6495%	0,1241%	0,7077%	0,5441%
	Porosidad	3,6135%	3,9177%	4,0505%	4,6738%	2,8868%
208	Densidad (g/ml)	0,1278%	0,4550%	0,3495%	0,8281%	0,3035%
	Porosidad	2,2228%	0,3701%	0,8748%	2,6647%	1,0497%

### 3.1.4 Morfología del material, empleando registro micrográfico

Utilizando el microscopio Motic Serie B1 se recopilaron imágenes de las muestras de diferentes granulometrías seleccionadas para el estudio. Previo encendido de la lámpara del microscopio, las imágenes se capturaron de la siguiente manera:

- a. Colocar una pequeña muestra de partículas en el porta-objetos.

- b. Aplicar unas gotas de agua destilada.
- c. Cubrir con el cubre objetos.
- d. Asegurar el porta-objetos a la plataforma.
- e. Cambiar el lente de menor a mayor aumento hasta divisar la imagen.
- f. Enfocar la imagen manipulando las perillas macrométricas y micrométricas del microscopio.
- g. Tomar la imagen con una cámara digital Sony DSC-S950.
- h. Capturar la imagen bajo el microscopio de una regla o elemento de medición milimétrico, en este caso, un recorte de cinta métrica.

El último paso se realizó con el fin de establecer una escala de medición. Digitalizando la foto con el programa PowerPoint de Microsoft, se construyó una escala de medición de tamaño de la partícula, dividiendo en partes iguales la longitud en mm que se observa en la fotografía, tales imágenes se presentan en el anexo B1; esta escala puede ser trasladada al resto de las imágenes tomadas bajo las mismas condiciones de enfoque. Las micrografías se presentan en la figura 4.6 del capítulo 4.

### 3.2 DETERMINACIÓN DEL EFECTO DEL PORCENTAJE DE PARAFINA Y GRANULOMETRÍA DE LAS PARTÍCULAS DE BAGAZO HIDROFOBADO, SOBRE LA CANTIDAD DE ACEITE SEPARADO DE UNA EMULSIÓN O/W SINTÉTICA

Se midió la densidad del hidrocarburo (kerosén), y luego se construyó una curva de calibración de hidrocarburo absorbido en agua usando para ello el método de transmisión de luz mediante el Turbiscan. La finalidad de tal ensayo fue encontrar una ecuación para estimar la cantidad de aceite separado de la emulsión durante el contacto con el filtro de bagazo hidrofobado. A continuación se explica el procedimiento utilizado.

### **3.2.1 Medición de la densidad del hidrocarburo**

Se determinó mediante la técnica del picnómetro la densidad del kerosén como hidrocarburo contaminante, procediendo como se indica:

- a) Pesar en la balanza electrónica, el picnómetro vacío de 50 ml con termómetro incorporado.
- b) Enrasar el volumen del picnómetro con kerosén Kiuk.
- c) Tapar el picnómetro.
- d) Limpiar con una servilleta el exceso de líquido que emana de la tapa del picnómetro, hasta que deje de fluir.
- e) Pesar el picnómetro lleno.
- f) Tomar la lectura de temperatura del termómetro incorporado al instrumento.

El ensayo se efectuó con tres repeticiones, los datos se muestran en la tabla 3.10.

**Tabla 0.10 Datos del kerosén generados durante prueba de densidad por la técnica del picnómetro**

Ensayo	Masa (g)	Temperatura (°C)	Volumen (ml)
Vacio	32,3757	-	50
Ensayo 1	73,0134	29	
Ensayo 2	72,6781	29	
Ensayo 3	73,0650	29	

Dado que la masa de kerosén se obtuvo por diferencia entre la masa del picnómetro lleno y vacío, se aprovechó que la ecuación 2.6 se basa en la definición de densidad, adaptándola para este caso, aplicándose junto a la ecuación 3.3 afin de obtener un valor promedio de la densidad del kerosén, procediendo así:

$$\rho_K = \frac{(73,0134 - 32,3757)g}{50ml}$$

$$\rho_K = 0,8128 \text{ g / ml}$$

$$\bar{\rho}_K = \frac{(0,8128 + 0,8060 + 0,8138)g / ml}{3}$$

$$\bar{\rho}_k = 0,8109 \text{ g / ml}$$

Los valores estimados se presentan en la tabla 3.11.

**Tabla 0.11 Valores de densidad determinados para el kerosén.**

	Densidad (g/ml)
Ensayo 1	0,8128
Ensayo 2	0,8060
Ensayo 3	0,8138
Promedio	0,8109

### 3.2.2 Construcción de la curva de calibración para el Turbiscan MA2000

La técnica utilizada para determinar la concentración de hidrocarburos en agua, está basada en el postulado de Lambert-Beer, que relaciona de forma directa la absorción de la luz en un cuerpo con la concentración del analito absorbente de luz, puesto que la absorptividad molar es constante. [19]

Por otra parte, el logaritmo de la transmitancia es equivalente a la absorbancia, por lo que resulta plausible trazar curvas que relacionen la concentración de una sustancia con el porcentaje de transmisión que aporta al medio, siendo válida bajo ciertas restricciones, como la baja concentración del analito.

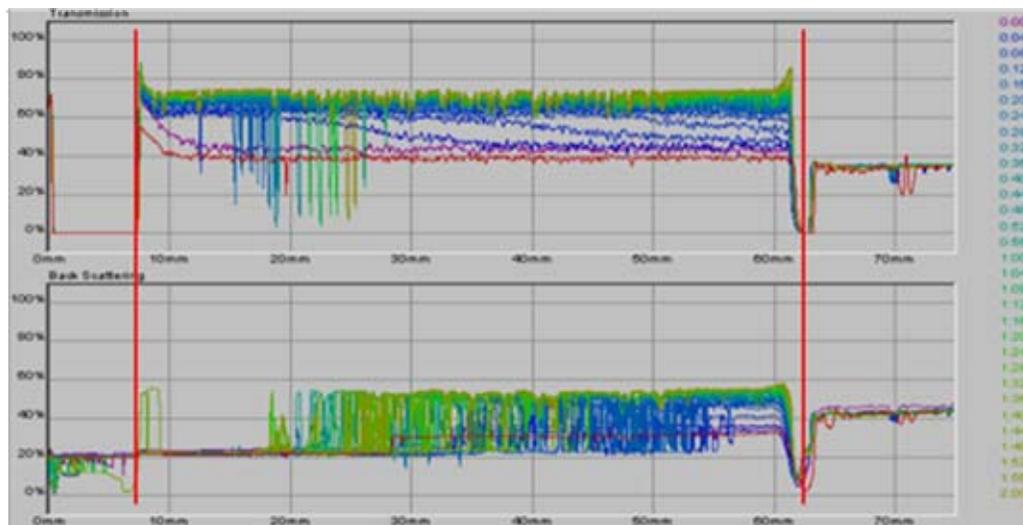
El método empleado es una aplicación de los estudios presentados por la empresa *Fomulation*, sobre el efecto de la fracción volumétrica de partículas dispersas en la transmisión y retrodifusión de una suspensión de látex.[20] Afín de establecer un paralelismo en este caso, fue necesario suponer que, al tratarse de fracciones de aceite muy bajas, las gotas prácticamente no coalescen debido a que se encuentran muy distantes entre sí y su tamaño debe ser bastante pequeño; ello permite que se comporten aproximadamente como una partícula rígida, estabilizada además por la presencia de un agente surfactante.

Las suposiciones anteriores se sustentaron utilizando la función de múltiples barridos de luz que ofrece el equipo, en la cual recolecta un número determinado de barridos en un período indicado, mostrando en el tiempo como varía la trasmisión y la retrodifusión de la luz a lo largo de la celda. El comportamiento mostrado en esta prueba permitió identificar el mecanismo de estabilización de la dispersión. Para ello se preparó una emulsión a 500 ppm de kerosén, utilizando como fase oleica una dilución de kerosén al 1% en volumen de SPAN 80, *Sigma Aldrich* grado análisis. El estudio de la estabilidad de la emulsión se explica a continuación:

- a. Agregar 0,3 ml de la dilución de SPAN 80 en vaso precipitado de 600 ml con jeringa de 0,5 ml  $\pm 0,01$ ml
- b. Incorporar un volumen de 500 ml de agua destilada medidos en probeta de  $500 \pm 2$  ml

- c. Agitar durante 20 min a 1000 rpm con agitador de aspa, *H Thomas Co.*, 1000 rpm.
- d. Extraer alícuota de 8 ml con jeringa de 10 ml  $\pm$  1 ml.
- e. Llenar celda con la muestra.
- f. Llevar la celda tapa al escaneo múltiple en el Turbiscan MA2000 con conexión a PC, para un total de 61 barridos distribuidos en un periodo de 2 h.
- g. Sacar la celda.
- h. Homogeneizar con 2 brazadas.
- i. Introducir la celda nuevamente.
- j. Tomar un escaneo.

En la figura 3.5 se presenta el gráfico generado por el software del equipo.



**Figura 3.5 Estabilidad de la dispersión con 500 ppm de kerosén.**

En la figura 3.5 el espacio ocupado por la emulsión en la celda se delimitó con dos barras rojas, y los barridos se ubican en la línea temporal al lado derecho de la figura 3.5; siendo el último barrido el presentado en color rojo; en este caso, el escaneo se trata de la emulsión redispersa por agitación, una vez que terminó las 2 h del escaneo múltiple.

Al estudiar el comportamiento de la dispersión se encuentran los elementos clásicos para los modelos de evolución coalescente y migración por flotación (figura C.1 del anexo C). El descenso abrupto de la transmisión en la sección superior de la celda es indicativo de la formación de una nata, lo que se comprobó ópticamente al extraer la celda del equipo, aunque es necesario mencionar que la capa apenas se pudo apreciar como una aureola en el menisco; bajo esta premisa las gotas de aceite

se desplazarían hacia la superficie por diferencia de densidad, sin variar significativamente su diámetro.[19]

Por otra parte, luego de un corto período inicial, se observa a lo largo del gráfico, una variación prácticamente constante en la transmisión y retrodispersión de la luz, propio de un sistema bajo coalescencia, tendiendo a alcanzar un valor constante de transmisión al estabilizarse.[19] Si se estudia con mayor detenimiento el gráfico de transmisión, se observa que durante los primeros 20 min ocurre la mayor parte de la transición entre la transmisión inicial y final, aunado a ello, en este corto tiempo se identifican perfiles decrecientes de transmisión a lo largo de la celda, esto puede sustentar la idea de la estabilidad migratoria, puesto que la interpretación de estos perfiles apuntan al ascenso de las gotas de aceite, opacando la sección superior a la vez que se clarifica la sección inferior.

El análisis se completa al tener en cuenta que luego de 2 h, con tan sólo agitar la celda, se obtuvo una medición de transmisión (curva roja) muy cercana a la inicial (curva morada); ello implica que la transmisión para este sistema es prácticamente constante siempre que se garantice la homogeneidad de la dispersión. Aunque no se descarta la posibilidad de coalescencia, los resultados indican que este fenómeno no debe ser preponderante, dado que redispersando la emulsión puede obtenerse una transmisión bastante cercana a la inicial; revalidando la aplicabilidad del método propuesto.

Las inconsistencias en la turbigrafía alrededor de los 20 mm, se deben posiblemente a la adhesión de burbujas de aire en las paredes de la celda.

Para construir la curva de calibración se prepararon dispersiones O/W utilizando como fase oleica la dilución antes mencionada, manteniendo las condiciones y metodología de preparación, variando la concentración entre 0 y 0,1% v/v de kerosén en agua, los porcentajes manejados se muestran en la tabla 3.12 junto a los respectivos valores del porcentaje de transmisión y retrodifusión recolectados. El procedimiento en cada caso fue el siguiente:

- a. Añadir 10 ml de la dispersión en una celda del Turbiscan MA2000.
- b. Insertar la celda en el equipo.
- c. Realizar un escaneo de la celda utilizando el software del equipo.
- d. Tomar la lectura del porcentaje de transmisión y retrodifusión a 40, 50 y 60 mm.
- e. Extraer la celda.
- f. Lavar cuidadosamente la celda.

Se llevó a cabo la repetición del 60% de los análisis y se seleccionaron aquellos valores de transmisión y retrodifusión que al graficarse respecto a la fracción volumétrica de la fase dispersa demostraron el mejor comportamiento en relación al ajuste polinómico de segundo orden seleccionado.

Partiendo de los datos promediados para los ensayos, compilados en la tabla 3.12, se construyó la figura 3.7 que presenta los gráficos de transmisión y

retrodifusión, junto a sus respectivas ecuaciones de ajuste obtenidas mediante al programa de Microsoft Excel.

**Tabla 0.12 Valores medidos y promediados del porcentaje de transmisión y retrodifusión variando la fracción másica de la fase dispersa.**

Porcentaje v/v	% Retrodifusión				% Transmisión			
	4 mm	5 mm	6 mm	Promedio	4 mm	5 mm	6 mm	Promedio
0,00%	77,9171	77,3415	77,3415	77,5334	99,2146	99,2146	99,2146	99,2146
0,00%	-	-	-	-	97,4878	97,4878	97,4878	97,4878
0,00%	77,3415	77,3415	77,3415	77,3415	95,761	95,761	96,9122	96,1447

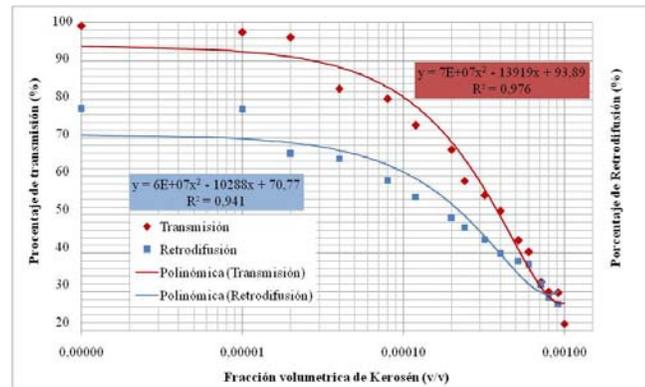
**Tabla 0.13 Valores medidos y promediados del porcentaje de transmisión y retrodifusión variando la fracción másica de la fase dispersa (continuación).**

Porcentaje v/v	% Retrodifusión				% Transmisión			
	4 mm	5 mm	6 mm	Promedio	4 mm	5 mm	6 mm	Promedio
0,00%	65,8293	65,8293	65,8293	65,8293	82,822	82,822	82,822	82,8220
0,01%	64,678	64,678	64,678	64,6780	80,2195	80,2195	80,2195	80,2195
0,02%	49,1366	49,1366	49,1366	49,1366	58,922	58,922	58,922	58,9220
0,04%	39,9268	39,9268	39,9268	39,9268	43,3805	43,3805	43,3805	43,3805
0,04%	36,4732	36,4732	36,4732	36,4732	38,2	37,6244	38,2	38,0081
0,01%	60,0732	60,0732	58,992	59,7128	73,8878	73,8878	73,7888	73,8548
0,02%	52,0146	52,5902	52,5902	52,3983	64,687	64,1024	64,1024	64,2973
0,03%	47,4098	47,4098	47,4098	47,4098	57,1951	57,1951	57,1951	57,1951
0,04%	43,3875	43,3875	43,3875	43,3875	50,8634	50,2878	50,8634	50,6715
0,05%	38,7756	39,3512	39,3512	39,1593	42,2293	42,8043	42,2293	42,4210
0,06%	35,322	35,322	35,322	35,3220	34,6463	34,6463	34,6463	34,6463
0,07%	28,9902	28,9902	28,9902	28,9902	25,5366	25,5366	25,5366	25,5366
0,08%	28,9902	29,5659	29,5659	29,3740	24,961	25,5366	25,5366	25,3447
0,09%	28,4146	28,4146	28,9902	28,6065	24,3854	24,3854	24,3854	24,3854
0,10%	24,3854	24,3854	24,3854	24,3854	19,2049	18,0537	16,9024	18,0537
Porcentaje v/v	4 mm	5 mm	6 mm	Promedio	4 mm	5 mm	6 mm	Promedio
0,01%	58,3463	58,3463	58,3463	58,3463	73,3122	73,3122	73,3122	73,3122
0,02%	57,1951	57,1951	57,1951	57,1951	69,8585	69,8585	69,8585	69,8585
0,03%	46,2585	46,2585	46,2585	46,2585	53,1659	53,1659	53,1659	53,1659
0,04%	43,9561	43,9561	43,9561	43,9561	51,439	51,439	51,439	51,4390
0,05%	40,5024	40,5024	40,5024	40,5024	43,9561	43,9561	45,1073	44,3398
0,06%	41,0781	40,5024	41,0781	40,8862	46,2585	46,2585	46,2585	46,2585
0,07%	37,0488	37,0488	37,0488	37,0488	39,9268	39,9268	39,9268	39,9268
0,08%	34,1707	34,7463	34,1707	34,3626	34,7463	34,7463	34,7463	34,7463

0,09%	34,7463	34,7463	34,7463	34,7463	35,322	35,322	35,322	35,3220
0,10%	29,5659	29,5659	29,5659	29,5659	25,5366	25,5366	25,5366	25,5366

**Tabla 0.14 Valores promedios de la transmisión y retrodifusión respecto a la fracción volumétrica de kerosén y su equivalente en concentración (ppm).**

Porcentaje v/v	Concentración ppm	Retrodifusión %	Transmisión %
0,00000	0	77,53337	99,2146
0,00001	8	-	97,4878
0,00002	16	77,34150	96,1447
0,00004	33	65,82930	82,8220
0,00008	65	64,67800	80,2195
0,00012	98	59,02955	73,3122
0,00020	163	54,79672	67,0779
0,00024	195	49,13660	58,9220
0,00032	260	46,83415	55,1805
0,00040	325	43,67180	51,0551
0,00052	423	39,83087	43,3804
0,00060	488	38,10410	40,4524
0,00072	585	37,04880	32,7317
0,00080	650	31,86828	30,0455
0,00092	748	28,60647	29,8537
0,00100	813	26,97565	21,7951



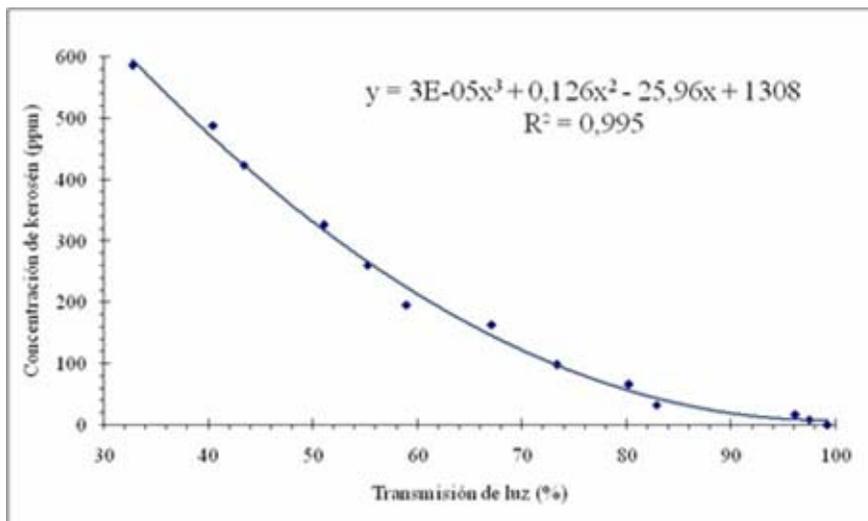
**Figura 3.6 Curvas de transmisión y retrodifusión respecto a la fracción volumétrica de aceite.**

Como lo reporta la bibliografía consultada [19] y se observa en el anexo C.2, al variar la fracción volumétrica de la fase dispersa, se afecta sensiblemente la transmisión y retrodifusión de la luz en la dispersión. En el rango entre 0 y 0,001 de la fracción volumétrica o régimen diluido, el ajuste de los datos de transmisión es mejor que el expuesto por los datos de retrodifusión; el modelo de transmisión tiene aplicación hasta la zona donde la dispersión se vuelve opaca y no permite el paso de la luz, a partir de la cual adquieren preponderancia y aplicabilidad el modelo de retrodifusión.

Al observar las figura 3.6, comparando tanto el comportamiento de los datos como el ajuste a la curva polinómica propuesta, se constató el comportamiento teórico de los modelos para el régimen diluido (figura C2 del anexo C); por un lado los datos de transmisión se distribuyen mejor y en un rango mucha más amplio que los de retrodifusión, lo que favorece al método propuesto para la medición de la

composición de aceite, y por otro el ajuste al modelo polinómico del mismo orden resultó para la transmisión de 0,976, siendo éste mayor al obtenido para la retrodifusión de 0,941.

Seleccionado entonces el modelo de transmisión para el estudio, se procedió a graficar los valores de la tabla 3.12 de concentración de kerosén en un rango de 0 a 585 ppm, respecto a la transmisión; lo que obedece a los límites de concentración manejados en el estudio, generando así la figura 3.7. Como en el caso de la figura anterior se propuso un modelo de ajuste polinómico, en esta ocasión de tercer orden, haciendo uso del programa de Microsoft Excel para obtener la ecuación de polinomio y el ajuste de los datos al mismo.



**Figura 3.7 Curva de ajuste entre la concentración de kerosén disperso y la trasmisión de luz en la emulsión.**

El polinomio obtenido (Ec. 3.6) se empleó en lo que sigue como la correlación que permite la estimación de la concentración (en ppm) de la fase aceite, a partir de datos de porcentaje de transmisión, para una emulsión preparada bajo las condiciones señaladas de velocidad y tiempo de agitación; así como concentración inicial de surfactante en la fase oleica.

$$C_k = 3E-05T^3 + 0,126T^2 - 25,96T + 1308 \quad (\text{Ec. 3.6})$$

donde  $C_k$  es la concentración en ppm de kerosén disperso y T el porcentaje de transmisión de la muestra.

### **3.2.3 Diseño experimental**

Se planteó un diseño experimental multifactorial con 2 repeticiones, utilizando 5 niveles para el porcentaje másico de parafina y 4 para la granulometría, tal como se planteó en la caracterización de las partículas; obteniendo así un total de 20 fórmulas cuyo efecto sobre la remoción de aceite se probó mediante 60 ensayos de prueba de botella. La preparación de la dispersión se efectuó manteniendo el método y condiciones del apartado 3.2.2, con una concentración de 500 ppm de la solución al 1% v/v del surfactante no iónico Span 80 disuelto en kerosén comercial.

Una vez preparada la emulsión, se aplicó el siguiente esquema de trabajo:

- a. Tomar en cilindro graduado de 50 ml  $\pm$  1 ml alícuota de 40 ml de emulsión.
- b. Incorporar la emulsión, magneto agitador y 1 g de la formulación correspondiente al matraz con rosca de 50 ml.
- c. Tapar el matraz.
- d. Llevar al agitador magnetico Ika C-MAG HS 7 de 6 velocidades.
- e. Iniciar la agitación rápida (3200 rpm) por 5 min.
- f. Continuar mezclado medio (760 rpm) por 5min.
- g. Terminar con mezclado lento con (270 rpm) durante 5 min.
- h. Dejar en reposo por 30 min.
- i. Extraer como muestra 10 ml de agua utilizando jeringa de 10 ml  $\pm$  1 ml.
- j. Agregar en celda.
- k. Sellar la celda.
- l. Homogenizar con 2 brazadas la muestra en la celda.
- m. Analizar en el Turbiscan MA2000

- n. Obtener los valores del porcentaje de transmisión a 40, 50 y 60 mm de altura de la celda.

Se preparó una emulsión para cada ensayo, en los que se mantenía constante el porcentaje de parafina y se variaba la granulometría de la formulación. Los datos de transmisión se presentan en la tabla 3.14.

**Tabla 0.15 Porcentajes de transmisión del agua luego de la prueba de jarra.**

Diámetro promedio de partículas ( $\mu\text{m}$ )	Distancia (mm)	Contenido de parafina (% m/m)					
		0%			30%		
1.251	4	42,8049	45,1073	42,2293	64,8	61,8	58,3453
	5	42,8049	45,1073	43,3085	61,2244	61,8	58,922
	6	42,8049	45,1073	42,8049	61,2244	61,8	58,922
720	4	41,673	35,322	37,6244	53,1659	55,4683	45,1073
	5	42,2293	35,8976	37,6244	53,7415	55,8927	45,1073

	6	42,2293	35,8976	37,6244	53,7415	55,4683	45,1073
457	4	64,1024	35,876	60,6488	87,1268	85,4	78,4927
	5	64,1024	35,876	60,6488	87,1268	85,9756	78,4927
	6	64,678	35,876	60,0732	87,7024	85,9756	78,4927
208	4	29,5659	35,322	38,2	81,3707	83,0976	87,1268
	5	29,5659	35,322	38,2	80,7961	83,0976	87,7024
	6	29,5659	35,322	38,2	81,3707	83,6732	87,7024
<b>Diámetro promedio de partículas (µm)</b>	<b>Distancia (mm)</b>	<b>40%</b>			<b>50%</b>		
1.251	4	63,5268	65,8293	68,7073	66,9805	61,8	63,5268
	5	64,1024	65,8293	69,2829	66,9805	61,8	63,5268
	6	64,1024	65,8293	69,2829	66,9805	61,2244	63,5268
720	4	64,1024	60,6488	56,6195	60,6488	68,7073	48,561
	5	64,678	60,0732	56,6195	60,6488	68,1317	48,561
	6	64,678	60,0732	56,1951	60,6488	69,2829	48,561
457	4	79,6439	84,8244	88,8537	87,1268	83,097	88,8537
	5	79,6439	84,8244	88,8537	87,7024	83,6732	88,8537
	6	79,6439	84,8244	88,2781	87,7024	83,6732	88,2781
208	4	80,7961	82,222	79,0683	85,9756	78,4927	87,7024
	5	80,7961	82,222	79,6439	85,9756	78,4927	87,1278
	6	81,3707	82,222	80,2195	85,9756	79,0683	87,7024
<b>Diámetro promedio de partículas (µm)</b>	<b>Distancia (mm)</b>	<b>60%</b>					
1.251	4	65,8293	76,1902	65,2537			
	5	66,4049	76,6146	66,4049			
	6	65,8293	76,1902	66,4049			
720	4	63,5268	63,5268	60,0732			
	5	63,5268	63,5268	60,6488			
	6	64,678	63,5268	60,6488			

**Tabla 0.16 Porcentajes de transmisión del agua luego de la prueba de jarra (continuación).**

		Contenido de parafina (% m/m)
Diámetro	Distancia	60%

<b>promedio de partículas (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>(mm)</b>			
457	4	81,9463	77,3451	68,7024
	5	81,9463	77,3451	68,2829
	6	81,9463	77,3451	68,2829
208	4	85,4	87,1268	87,7024
	5	85,4	82,7024	87,7024
	6	85,4	82,7024	87,7024

Los datos de la tabla anterior se promedian y presentan en la tabla 3.15.

Durante los ensayos se apreció que las formulaciones que carecían de parafina coloraban el agua, hecho que sin lugar a duda afecta la lectura de transmisión, puesto que indica la presencia de otra sustancia disuelta, muy probablemente, remanentes de suciedad. Es de destacar que el bagazo empleado durante la experiencia proviene de una muestra tratada para almacenamiento, lo que normalmente consiste en secado al sol en patios abiertos, [8] facilitando su contaminación con diversas partículas; es posible que aún con el cuidadoso lavado, no se pudiera eliminar del todo tal suciedad, aunado al hecho de contener por su naturaleza vegetal remanentes de compuestos carbohidratos colorantes. Por su parte, las formulaciones con contenido de parafina, no coloraron el agua, quizá por el mismo recubrimiento con parafina.

**Tabla 0.17 Valores promedio de la transmisión luego de la prueba de jarra.**

<b>Contenido de parafina (% m/m)</b>
--------------------------------------

<b>Diámetro promedio de partículas (µm)</b>	<b>0%</b>			<b>30%</b>		
1.251	42,8049	45,1073	42,7809	62,4163	61,8000	58,7298
720	42,0439	35,7057	37,6244	53,5496	55,6098	45,1073
457	64,2943	35,8760	60,4569	87,3187	85,7837	78,4927
208	29,5659	35,3220	38,2000	81,1792	83,2895	87,5105
<b>Diámetro promedio de partículas (µm)</b>	<b>40%</b>			<b>50%</b>		
180	63,9105	65,8293	69,0910	66,9805	61,6081	63,5268
720	64,4861	60,2651	56,4780	60,6488	68,7073	48,5610
457	79,6439	84,8244	88,6618	87,5105	83,4811	88,6618
208	80,9876	82,2220	79,6439	85,9756	78,6846	87,5109
<b>Diámetro promedio de partículas (µm)</b>	<b>60%</b>					
1.251	66,0212	76,3317	66,0212			
720	63,9105	63,5268	60,4569			
457	81,9463	77,3451	68,4227			
208	85,4000	84,1772	87,7024			

Valiéndose de la aditividad de la Ley de Lambert Beer fue posible estimar la absorbancia que aporta uno de los elementos en una mezcla, en el caso de existir dos compuestos es necesario conocer la absorbancia de la mezcla y determinar la absorbancia de alguno a la concentración inicial. Esta ley se rige por la ecuación:[19]

$$A = A_1 + A_2 \quad (\text{Ec. 3.7})$$

donde  $A$  es la absorbancia total,  $A_1$  y  $A_2$  la absorbancia de los compuestos 1 y 2 en disoluciones separadas aunque en igual proporción. En este caso se considera que las sustancias colorantes propias del bagazo constituyen un compuesto y el kerosén disperso otro; así pues la absorbancia total o combinada fue la medida luego de la prueba.

Utilizando el mismo volumen que se empleó durante el ensayo (40 ml), se recrearon las condiciones de tiempo de residencia, velocidad de agitación y tiempo de reposo, pero esta vez con agua destilada, afín de hallar el aporte promedio de los compuestos solubles del bagazo sobre la absorbancia de la disolución ( $A$ ). Puesto que las mediciones son en porcentaje de transmisión ( $T\%$ ), se sabe que:[19]

$$A = \log \frac{100}{T\%} \quad (\text{Ec. 3.8})$$

La expresión 3.8 representa la equivalencia entre la absorbancia y el porcentaje de transmisión; sustituyéndola en la ecuación 3.7 y con arreglos matemáticos se tiene:

$$\%T_k = 100 \frac{\%T}{\%T_s} \quad (\text{Ec.3.9})$$

donde  $\%T$  es el porcentaje de transmisión de la mezcla,  $\%T_s$ , es el determinado para los compuestos solubles del bagazo solubilizados en agua destilada, mientras que  $\%T_k$  es el porcentaje de transmisión para el kerosén disperso luego del tratamiento. La tabla 3.16 presenta los valores de  $\%T_s$  para las formulaciones de bagazo carentes de parafina.

**Tabla 0.18 Valores de transmisión aportados por los compuestos solubles del bagazo en agua destilada.**

Diámetro promedio de partículas (µm)	Distancia (mm)			Promedio de %T <sub>s</sub>
	40	50	60	
1.251	83,0976	83,0976	83,0976	83,0976
720	71,5854	72,7366	72,7366	72,3529
457	76,6146	77,3415	76,7659	76,9073
208	91,1561	91,1561	91,1561	91,1561

Aplicando la expresión 3.8 se procedió a corregir los datos de transmisión de la tabla 3.14 para las formulaciones carentes de cera, como se muestra a continuación:

$$\%T_k = 100 \frac{42,8049}{83,0976}$$

$$\%T_k = 51,5116$$

Los datos corregidos y sus respectivos promedios se muestran en la tabla 3.17.

**Tabla 0.19 Valores promedios de transmisión corregidos**

**para las formulaciones con 0% m/m de parafina.**

Diámetro promedio de partículas (µm)	Promedio de %T <sub>k</sub>		
	40	50	60
1.251	51,5116	54,2823	51,4827

720	58,1095	49,3494	52,0013
457	83,5997	46,6483	78,6101
208	32,4344	38,7489	41,9061

Haciendo uso de la expresión 3.6 desarrollada en sección anterior, se determinó la concentración de hidrocarburos luego del tratamiento, sustituyendo en el polinomio los datos de las tablas 3.15 y los datos corregidos de la tabla 3.17, se obtuvo:

$$C_k = 3E-05(51,5116)^3 + 0,126(51,5116)^2 - 25,96(51,5116) + 1308 \text{ [ppm]}$$

$$C_k = 309,19 \text{ ppm}$$

Los resultados de las pruebas se expresaron en porcentaje de separación de hidrocarburos, por lo que se aplicó la siguiente expresión:

$$\%S_h = \frac{(C_0 - C_k)}{C_0} 100 \quad (\text{Ec. 3.10})$$

donde %  $S_h$  es el porcentaje de separación o remoción de hidrocarburos,  $C_0$  es la concentración inicial y  $C_k$  la concentración de hidrocarburos hallada luego del tratamiento. De conformidad con esto se estimó:

$$\%S_h = \frac{(500 - 309,19) \text{ ppm}}{500 \text{ ppm}} 100$$

$$\%S_h = 38,16 \%$$

La tabla 3.18 muestra los valores del porcentaje de separación de hidrocarburos obtenidos en los diferentes ensayos.

**Tabla 0.20 Resultados del porcentaje de remoción de hidrocarburos respecto a la granulometría y porcentaje de cera.**

Diámetro promedio de partículas ( $\mu\text{m}$ )	Contenido de parafina (% m/m)					
	0%			30%		
1.251	38,16	45,02	38,09	62,83	61,60	55,19
720	53,83	32,53	39,40	43,25	48,16	20,77
457	92,82	25,15	87,90	95,63	94,56	87,77
208	-	1,40	11,28	90,60	92,56	95,75
Diámetro promedio de partículas ( $\mu\text{m}$ )	40%			50%		
	1.251	65,73	69,27	74,85	71,30	61,22
720	66,81	58,46	50,17	59,26	74,22	30,42
457	89,03	93,83	96,46	95,75	92,72	96,46
208	90,41	91,60	89,03	94,70	87,99	95,75
Diámetro promedio de partículas ( $\mu\text{m}$ )	60%					
	1.251	69,61	85,22	69,61		
720	65,73	64,99	58,86			
457	91,34	86,45	73,75			

208	94,27	93,31	95,87
-----	-------	-------	-------

En la tabla 3.19 se presentan los valores promedios de remoción de hidrocarburos. Se determinaron los porcentajes de desviación estándar entre los resultados obtenidos haciendo uso del programa Excel de Microsoft, compilándose en la tabla 3.20.

**Tabla 0.21 Valores promedios de la remoción de hidrocarburos respecto a la granulometría y porcentaje de cera.**

Diámetro promedio de partículas ( $\mu\text{m}$ )	Porcentaje de remoción (%)				
	Contenido de parafina (% m/m)				
	0%	30%	40%	50%	60%
1.251	40,42	59,88	69,95	65,84	74,81
720	41,92	45,71	58,48	54,63	63,19
457	90,36	92,65	93,11	94,98	83,85
208	40,53	92,97	90,35	92,81	94,48

**Tabla 0.22 Desviación estándar de los resultados sobre la remoción de hidrocarburos respecto a la granulometría y porcentaje de cera.**

Diámetro promedio de partículas ( $\mu\text{m}$ )	Desviación estándar (%)				
	Contenido de parafina (% m/m)				
	0%	30%	40%	50%	60%
1.251	3,98	4,10	4,60	5,09	8,84
720	10,87	14,60	8,32	22,27	16,68
457	37,73	4,26	3,76	1,98	9,73

208	17,70	2,60	1,28	4,21	1,23
-----	-------	------	------	------	------

### **3.3 Identificación experimental del mecanismo de adsorción de los compuestos hidrocarburos sobre las partículas hidrofobadas de bagazo de caña**

Se procedió a la determinación del modelo isotérmico de adsorción, variando la concentración inicial de kerosén en la dispersión y manteniendo constante la formulación y dosis del tratamiento.[21]

Tomando en cuenta los resultados de la sección anterior se seleccionó la formulación de 30% de cera y 457  $\mu\text{m}$  de diámetro promedio. El método aplicado se presenta a continuación:

- a. Preparar la emulsión, manteniendo las especificaciones antes señaladas de velocidad de agitación y tiempo de agitación.
- b. Tomar alícuota de 40 ml en cilindro graduado de 50ml  $\pm$  1ml.
- c. Incorporar al matraz de 50 ml, junto con magneto y 1 g partículas hidrofobadas.
- d. Tapar el matraz.
- e. Llevar a la plancha de agitación Ika C-MAG HS 7.

- f. Agitar durante 30 min a 760 rpm.
- g. Dejar en reposo durante 1 h en baño a 25 °C.
- h. Extraer 10 ml de muestra del agua con jeringa de 10 ml.
- i. Agregar la muestra en la celda.
- j. Homogenizar la muestra con 2 brazadas antes del escaneo.
- k. Escanear en el equipo Turbiscan MA2000
- l. Leer del gráfico generado el porcentaje de transmisión a 40, 50 y 60 mm.
- m. Extraer la celda.

Se varió la concentración inicial entre 100 y 600 ppm, realizando entre 1 y 3 repeticiones, dependiendo si el caso lo ameritaba. Los datos de transmisión se compilaron en la tabla 3.20, junto con sus promedios y la conversión a concentración. Como se indica en la sección 2.8, fue necesario adaptar los resultados del ensayo para que coincidieran con las variables de estudio en un sistema de adsorción; por un lado la variable independiente  $c$  se expresa como la concentración del fluido en equilibrio (kg de adsorbato/m<sup>3</sup> de solución), para transformar la concentración en ppm se aplica el factor de conversión dado por la ecuación 3.11.

$$c[\text{kg}/\text{m}^3] = \frac{1\text{kg}}{10^6\text{mg}} \frac{10^4\text{l}}{1\text{m}^3} C_k[\text{mg}/\text{l}] = 10^{-2} C_k[\text{mg}/\text{l}] \quad (\text{Ec. 3.11})$$

Por otra parte, la variable independiente  $q$  refleja la capacidad de adsorción del sólido en el equilibrio (kg adsorbidos/kg de adsorbente), calculándose en función de los datos manejados mediante la ecuación 3.12, así:

$$q = V_c [ml] \frac{1}{M_a} \frac{1l}{10^3 ml} \frac{1g}{10^3 kg} (C_0 - C_k) [mg/l] \quad (\text{Ec. 3.12})$$

donde  $V_c$  es volumen de control en este caso 40 ml,  $M_a$  la masa del adsorbente 1 g y  $C_0$  la concentración inicial. Sustituyendo los datos en la expresión se tiene:

$$q = 40ml \frac{1}{1g} \frac{1l}{10^3 ml} \frac{1g}{10^3 kg} (C_0 - C_k) [mg/l]$$

$$q = 0,00004(C_0 - C_k) [mg/l]$$

**Tabla 0.23 Valores estimados de la pruebas de adsorción isotérmica.**

Concentración aceite (ppm)	Transmisión (%)				$C_k$ (ppm)	$c$ (kg/m <sup>3</sup> )	$q$ $\left(\frac{\text{kg}_{\text{ adsorbidos}}}{\text{kg}_{\text{ adsorbente}}}\right)$
	4	5	6	Promedio			
100	90,5805	90,5805	91,1561	90,7724	12,1797	0,1218	0,0035
	86,5512	87,1268	87,1268	86,9349	23,1479	0,2315	0,0031
133	83,6732	83,6732	83,6732	83,6732	35,5699	0,3557	0,0039
	76,7659	76,1902	76,1902	76,3821	73,6020	0,7360	0,0024
150	88,4293	88,2781	88,8537	88,5204	18,1380	0,1814	0,0053
	85,4000	85,9756	85,9756	85,7837	27,2073	0,2721	0,0049
165	79,6439	79,6439	79,6439	79,6439	54,8372	0,5484	0,0044
	75,6145	75,6145	75,6145	75,6145	78,4291	0,7843	0,0035
183	83,6732	83,6732	83,6732	83,6732	35,5699	0,3557	0,0059
	80,7951	80,7951	81,3707	80,9870	47,9339	0,4793	0,0054

200	77,3415	77,9171	77,3415	77,5334	66,6557	0,6666	0,0053
	83,0976	83,6732	82,5220	83,0976	38,0571	0,3806	0,0065
	78,4927	78,4927	78,4927	78,4927	61,1367	0,6114	0,0056
	85,4000	85,4000	85,4000	85,4000	28,6392	0,2864	0,0069
233	74,4634	75,0390	74,4634	74,6553	84,6813	0,8468	0,0059
	80,2195	80,2195	80,2195	80,2195	51,8198	0,5182	0,0072
250	80,2195	80,2195	80,2195	80,2195	51,8198	0,5182	0,0079
	77,3415	77,3415	77,3415	77,3415	67,7889	0,6779	0,0073
267	79,6439	79,6439	79,6439	79,6439	54,8372	0,5484	0,0085
	81,9463	81,9463	81,9463	81,9463	43,2973	0,4330	0,0089
278	77,9171	77,9171	78,4927	78,1090	63,3149	0,6331	0,0086
	75,0390	75,0390	75,0390	75,0390	82,1509	0,8215	0,0078
300	83,0976	83,6762	83,6762	83,4833	36,3805	0,3638	0,0105
	79,6439	79,6439	79,6439	79,6439	54,8372	0,5484	0,0098
	80,2195	80,2195	80,2195	80,2195	51,8198	0,5182	0,0099
	71,5854	72,1610	72,1610	71,9691	103,4884	1,0349	0,0079
350	77,9171	77,9171	77,9171	77,9171	64,4187	0,6442	0,0114
	72,7366	73,3122	73,3122	73,1203	95,1939	0,9519	0,0102
	72,1610	72,1610	72,7366	72,3529	100,6846	1,0068	0,0100
	73,8878	73,8878	73,8878	73,8878	89,8595	0,8986	0,0104
400	76,7659	77,3415	77,3415	77,1496	68,9318	0,6893	0,0132
	73,3122	73,8878	73,8878	73,6959	91,1785	0,9118	0,0124
	72,1610	72,1610	72,1610	72,1610	102,0816	1,0208	0,0119
	77,9171	77,9171	77,9171	77,9171	64,4187	0,6442	0,0134

**Tabla 0.24 Valores estimados de la pruebas de adsorción isotérmica  
(continuación).**

Concentración aceite (ppm)	Transmisión (%)				C <sub>k</sub> (ppm)	c (kg/m <sup>3</sup> )	q $\left(\frac{\text{kg}_{\text{ adsorbidos}}}{\text{kg}_{\text{ adsorbente}}}\right)$
	4	5	6	Promedio			
450	77,3415	77,3415	77,3415	77,3415	67,7889	0,6779	0,0153
	68,7073	69,2829	69,2829	69,0910	125,7610	1,2576	0,0130
500	72,1610	72,1610	72,1610	72,1610	102,0816	1,0208	0,0159
	66,9805	66,9805	66,9805	66,9805	143,4860	1,4349	0,0143
	73,3122	73,3122	73,3122	73,3122	93,8457	0,9385	0,0162
	66,4049	66,4049	66,4049	66,4049	148,5243	1,4852	0,0141
550	69,8585	69,8585	69,8585	69,8585	119,6075	1,1961	0,0172
	72,1610	72,1610	72,1610	72,1610	102,0816	1,0208	0,0179

600	64,1024	64,6780	65,2537	64,6780	164,1644	1,6416	0,0174
	71,0098	71,0098	71,5854	71,2017	109,2082	1,0921	0,0196
	58,3463	58,3463	58,9220	58,5382	226,1330	2,2613	0,0150
	72,7266	73,3122	73,3122	73,1170	95,2174	0,9521	0,0202

Las ecuaciones 3.11 y 3.12 se aplicaron directamente con los datos de la tabla 3.20, reportándose los valores estimados en la tabla 3.21.

Se prosiguió a seleccionar los valores de  $q$  y  $c$  con mejor comportamiento, extrayendo el logaritmo y obteniendo el inverso los mismos, ubicándose los valores estimados en la tabla 3.22.

### **3.5 Propuesta de un sistema adsorbente de partículas hidrofobadas de bagazo a escala de laboratorio**

Existen diferentes propuestas documentadas para el estudio de columnas de adsorción, aplicándose comúnmente para lechos de carbón activado [22] o mineral acondicionado [7]. La figura 4.8 ejemplifica una de estas propuestas.

El proceso en esencia se trata de hacer pasar un flujo de agua cuya concentración contaminante es conocida, a través de una o más columnas empacadas, realizando un seguimiento de la concentración del contaminante a la salida del lecho respecto al tiempo de operación; completando el estudio con variaciones en la longitud y caudal de alimentación a la columna.

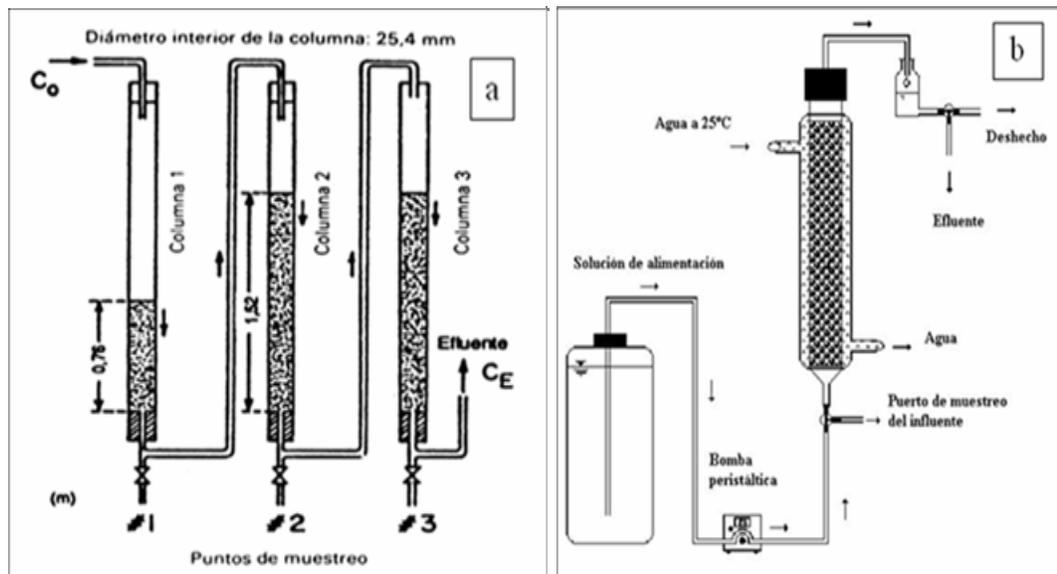
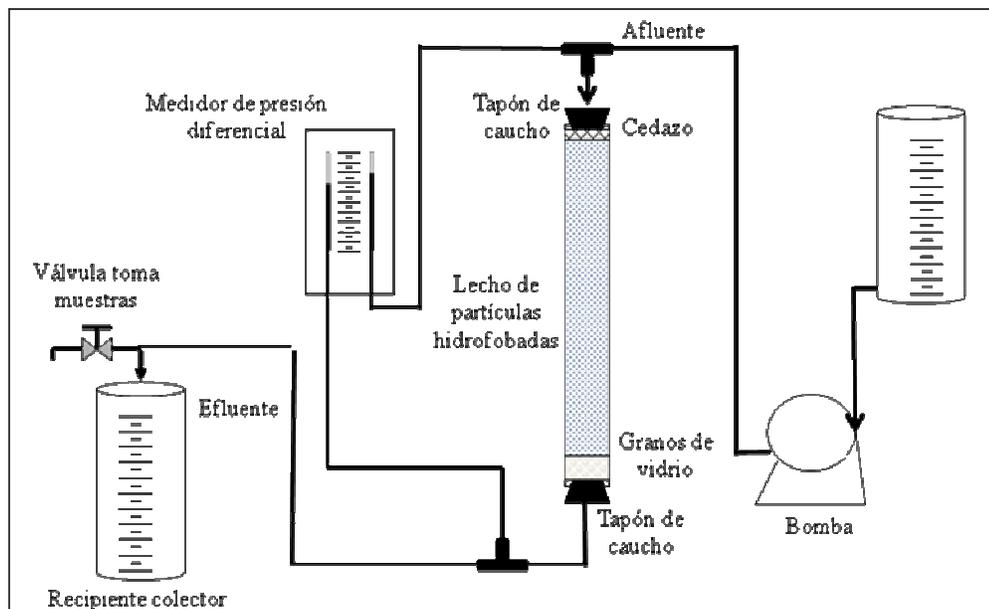


Figura 3.8 Columna de carbón activado escala semi-piloto.[22]

(b) Montaje experimental para pruebas rápidas de escalado en minicolumnas.[24]

Sin embargo, en este trabajo se propuso adicionar los elementos de medición necesarios para completar el estudio del flujo de fluido atravesando el lecho.[15, 17] El sistema planteado se esquematiza en la figura 3.9.



**Figura 3.9 Montaje experimental para la evaluación de lecho adsorbente de partículas hidrofobadas de bagazo.**

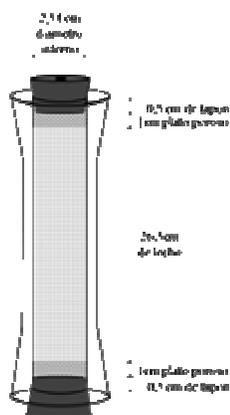
A fin de evaluar la propuesta se realizó su construcción, ajuste y ensayo. Los materiales utilizados para la construcción del equipo se listan a continuación:

- a. Bomba peristáltica Watson Marlow tipo MHRE 7.
- b. Tubo de vidrio de 29,5 cm de altura y diámetro interior de 2,54 cm
- c. Medidor de presión diferencial.
- d. Botella de vidrio Pyrex de 2.000 ml con toma lateral inferior.

- e. 2 Tapones de caucho N° 6
- f. Plato poroso de 3 mm.
- g. Cedazo de tela sintética.
- h. Beaker Pyrex de 600 ml.
- i. Manguera de  $\frac{1}{4}$ " para conexiones principales,  $\frac{1}{2}$ " y  $\frac{1}{8}$ " para empalmes y conexiones menores.
- j. 2 T de bronce de  $\frac{1}{4}$ "
- k. 19 cilindros graduados de 10 ml +/- 1ml
- l. 6 cilindros graduados de 25 ml +/- 1ml.
- m. 7 vasos de precipitado de 40 ml.
- n. 15 matraces de 50 ml.
- o. 7 beaker de 80 ml.
- p. Teflón.
- q. Malla metálica de 1 ml de abertura

- r. Cronómetro.
- s. Agitador magnético Ika C-MAG HS 7.
- t. Magneto.
- u. 2 soportes universales.
- v. 3 pinzas.
- w. 3 sujetadores de pinza

Durante la construcción y pruebas preliminares, se desechó la idea original del cedazo metálico en la parte superior de la columna debido a la dificultad para introducirlo a la misma, utilizándose tanto en la parte superior como inferior 1 cm de platos porosos (esferas de vidrio), como colchón para estabilizar y distribuir homogéneamente el fluido a la entrada y salida del lecho. Se recubrió cada tapón horadado con una malla de tela sintética para evitar el arrastre de lecho. La distribución de la columna se demuestra en la figura 3.10.



**Figura 3.10** Columna de lecho empacado diseñada en trabajo.

La bomba peristáltica se calibró utilizando agua destilada para medir el caudal respecto al índice en la perilla de graduación, determinándose además la velocidad de rotación (en rpm); estos datos se reportan en la tabla D.1 del anexo D. Para impulsar el fluido se instaló una manguera de látex de 1/8" entre los rodillos y la muesca de la bomba, sujetándola con las abrazaderas de la misma. En el extremo de succión, se instalaron varias conexiones de ampliación para acoplar con toma de 1/2" del recipiente de alimentación.

Se instalaron las T, sellando con teflón para evitar fugas y procurando realizar las tomas para la medición de caída de presión lo más próximas a la entrada y salida de la columna.

El montaje se construyó a tres niveles de altura: en el nivel superior la alimentación, en la que se ubicó el recipiente con el afluente que se mantuvo homogeneizado utilizando el agitador magnético; en la sección intermedia se ubicó la

columna y el medidor de presión diferencial, sujetos mediante pinzas a los soportes universales. Por último, en la sección inferior se recolectó el efluente del tratamiento con el beaker de 600 ml y se tomaron las muestras de agua tratada.

Se ajustó el diseño inicial con inyección superior a la columna, puesto que se produjo una canalización grave al probar tal modalidad; la inyección inferior ofreció mejores resultados respecto a este punto. Para atenuar la influencia de la variación de presión a la entrada del sistema, por efecto de la disminución de la altura de líquido en el recipiente de alimentación, se marcaron los niveles para 1.000 y 2.000 ml en el mismo, procurando mantener el nivel de líquido entre este rango.

Conservando la concentración inicial en 500 ppm, se preparó la emulsión bajo el esquema de las secciones anteriores, el montaje se operó de la siguiente forma:

- a. Ajustar la velocidad y dirección de impulso de la bomba.
- b. Encender la bomba.
- c. Esperar que el afluente empape el lecho.
- d. Permitir que las tomas de presión se llenen de fluido.
- e. Eliminar el aire de las tomas si lo hubiese.
- f. Conectar las tomas al manómetro.
- g. Encender el manómetro.

- h. Activar el cronómetro al producirse la primera gota de efluente.
- i. Tomar por lo menos 10 ml de muestra.
- j. Realizar 5 lecturas de la caída de presión.
- k. Llevar muestra a análisis.
- l. Determinar la concentración.
- m. Verificar la relación entre la concentración del efluente y la concentración inicial.
- n. Repetir tomando el tiempo desde el paso i, si la relación entre las concentraciones es menor a 0,5 (condición luego del punto de ruptura).

**Tabla 0.25 Datos recopilados en el montaje experimental de lecho adsorbente.**

Caudal (ml/s)		0,33				Transmisión (%)				Ck (ppm)	Ck/Co
Tiempo(min)	$\Delta P(kPa)$					40 mm	50 mm	60 mm	Promedio		
	0	0,44	0,83	2,04	0,99					2,64	77,3415
10	3,16	2,23	2,15	1,18	3,50	76,7659	77,3415	77,3415	77,1496	72,74	0,1455
20	0,18	0,58	1,00	1,55	0,60	66,49805	66,49805	66,49805	66,4981	150,66	0,3013
30	0,50	1,40	1,45	0,64	0,45	73,3122	73,8878	73,8878	73,6959	94,69	0,1894
40	0,60	0,84	1,34	0,63	1,03	65,8293	66,4049	66,4049	66,2080	153,16	0,3063
50	1,32	0,71	1,41	0,59	1,40	74,4634	74,4634	74,4634	74,4634	89,54	0,1791

60	0,51	0,60	1,62	1,19	1,60	70,4343	70,4343	70,4343	70,4343	118,35	0,2367
70	0,68	0,43	0,56	1,90	1,55	72,161	72,7366	72,7366	72,5447	102,72	0,2054
80	0,92	1,55	1,02	0,55	0,70	68,7073	68,7073	68,7073	68,7073	132,02	0,2640
90	0,68	0,76	0,42	0,62	1,55	71,5854	72,161	72,161	71,9691	106,86	0,2087
100	0,72	0,87	1,82	0,44	1,55	66,4049	66,4049	66,4049	66,4049	151,47	0,3029
120	0,83	0,73	1,63	0,62	1,75	64,678	64,678	64,678	64,678	166,99	0,3340
140	0,53	0,70	0,55	0,74	1,05	62,9512	62,9512	63,5268	63,1431	181,44	0,3629
160	2,26	1,59	0,44	1,62	0,60	65,8293	65,8293	65,8293	65,8293	156,56	0,3131
180	0,45	0,57	1,65	0,59	0,69	62,3756	62,3756	62,9012	62,5508	187,18	0,3744
200	0,89	0,67	1,67	0,80	0,54	62,3756	61,8	62,3756	62,1837	190,79	0,3816
220	0,58	0,63	1,16	0,71	0,84	63,5268	63,5268	63,5268	63,5268	177,77	0,3555
240	2,40	0,48	0,82	1,25	0,58	60,6488	60,0732	60,6488	60,4569	208,23	0,4165
260	1,80	0,60	0,72	1,48	2,05	64,678	64,678	64,678	64,678	166,99	0,3340
280	2,18	0,58	0,88	2,12	0,87	57,7707	57,7707	57,7707	57,7707	236,93	0,4739
300	0,47	0,70	1,67	0,60	0,72	58,922	58,922	58,4976	58,7805	225,92	0,4518
320	0,87	0,60	0,70	0,90	1,86	64,1024	64,1024	64,1024	64,1024	172,33	0,3447
340	1,00	2,09	0,47	1,11	1,18	56,6195	56,6195	56,6195	56,6195	249,81	0,4996
360	2,17	1,01	1,44	0,68	0,70	55,4683	56,0439	55,4683	55,6602	260,81	0,5216
380	0,88	1,83	0,96	1,48	0,63	54,8927	54,8927	54,8927	54,8927	269,79	0,5396
400	0,72	1,42	0,55	0,74	1,79	50,8634	50,8634	50,8634	50,8634	319,45	0,6389
420	2,07	0,87	0,63	0,88	1,11	57,7707	58,3406	57,7707	57,9607	234,84	0,4697
440	1,47	0,72	0,90	1,58	0,82	57,7707	57,7707	57,7707	57,7707	236,93	0,4739
460	0,73	1,45	0,63	0,88	1,24	60,6488	60,6488	60,6488	60,6488	206,26	0,4125
480	1,06	0,80	1,63	2,20	0,57	52,0146	52,0146	52,0146	52,0146	304,83	0,6097
500	1,04	0,62	0,81	1,42	0,60	52,0146	52,0146	52,0146	52,0146	304,83	0,6097
520	0,79	1,18	0,64	0,83	1,23	57,1951	56,6195	56,6195	56,8113	247,64	0,4953
530	1,00	0,58	0,73	1,50	0,51	44,5317	44,5317	44,5317	44,5317	406,10	0,8122

Los datos para la prueba del montaje se presentan en la tabla 3.23.

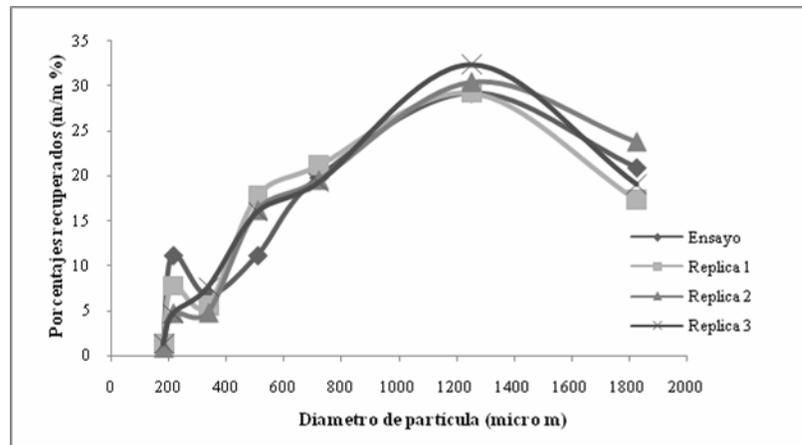
## **CAPITULO IV**

### **DISCUSIÓN DE RESULTADOS, CONCLUSIÓN Y RECOMENDACIONES**

#### **4.1 Caracterización de la granulometría, morfología y densidad de las partículas de bagazo de caña hidrofobado**

##### **4.1.1 Distribución granulométrica**

Los resultados de los ensayos del apartado 3.1.1 se presentan como gráficos del porcentaje másico retenido respecto al diámetro de partícula en la figura 4.1, notándose que tanto el comportamiento de las curvas, como los valores reportados por los diferentes ensayos tienen un comportamiento bastante similares. Estudiando la distribución se tiene que en una muestra de bagazo seleccionado, el grueso de las partículas detenta diámetros entre 1200 y 1800  $\mu\text{m}$ , apreciándose aparentemente una relación creciente entre las variables del grafico para el rango entre 200 y 1200  $\mu\text{m}$ . Para los ensayos posteriores se descarto la fracción de mayor diámetro de partícula, lo que representa alrededor de un 25% de una muestra normal.



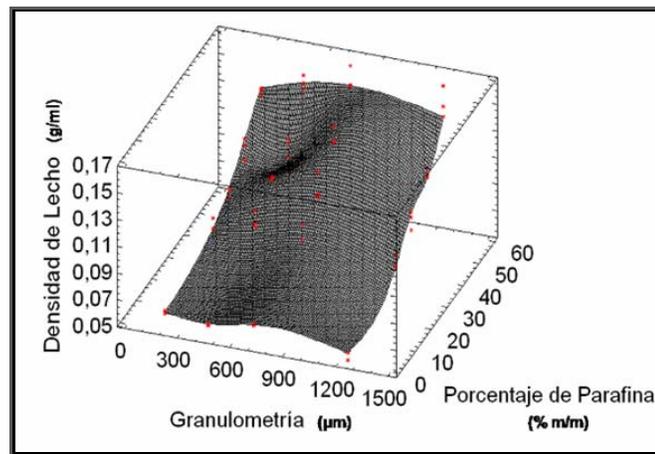
**Figura 4.1 Curvas granulométricas.**

Partiendo del análisis de la distribución del diámetro de partículas y obedeciendo la restricción de 4 niveles estadísticos para el factor granulométrico, se seleccionaron las granulometrías de trabajo, optando por realizar mezclas de aquellas fracciones de menor porcentaje, lo que permitió además obtener una distribución equitativa del tamaño de partículas. En la práctica las operaciones de adsorción con carbón activado en columnas continuas se lleva a cabo con material granulado de 40 a 80 mesh, [22]. No obstante se decidió continuar el estudio con gránulos más gruesos en atención a la importancia de sus porcentajes máxicos en la muestra, lo que resultaría ventajoso operacional y económicamente de ser efectivos para el tratamiento.

#### **4.1.2 Densidad de lecho**

En la figura 4.2 se muestra una superficie de respuesta en el cual se evidencia una relación marcada entre la densidad de las partículas y el porcentaje de parafina

hidrofobante. También se tiene, aunque menos perceptible, una relación entre la densidad y la granulometría. Los valores de densidad de lecho se encuentran entre 0,0564 y 0,0954 g/ml (reportados en la tabla 3.5), relaciones tan bajas entre la masa y el volumen ofrecen ventajas de transporte y de manejo, más no de almacenamiento.

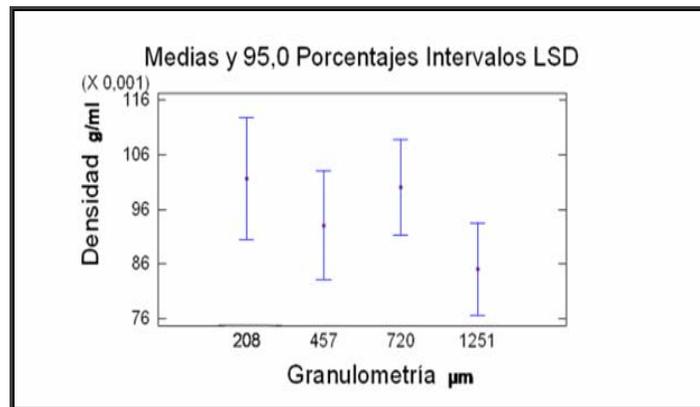


**Figura 4.2 Superficie de respuesta de la densidad de lecho respecto a la granulometría y al porcentaje de parafina hidrofobante.**

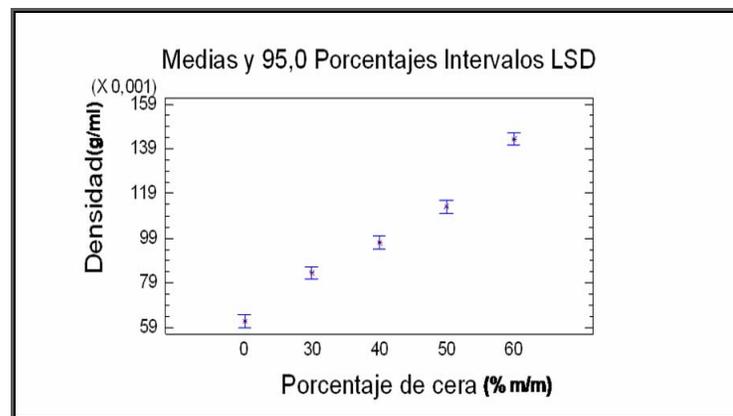
En las figuras 4.3 y 4.4 se muestran los gráficos de las medias generados del análisis de varianza multifactorial (ANAVA), aplicado a los datos de la figura anterior mediante el programa Statgraphics Plus.

Las figuras 4.3 y 4.4 permiten corroborar la información obtenida en el gráfico de superficie por medio del comportamiento de las medias; por un lado la relación entre la densidad del lecho y la granulometría se muestra inversamente proporcional, lo que tiene sentido si se considera a las partículas como esferas desde la perspectiva más sencilla, a medida que su diámetro sea menor, mejor será su arreglo y se reducirá

el espacio vacío entre ellas, al apiñarse más unas con otra ocuparan menos volumen lo que aumentaría su densidad.



**Figura 4.3** Gráfico de medias de la densidad de lecho respecto a la granulometría.



**Figura 4.4** Gráfico de medias de la densidad de lecho respecto al porcentaje de cera.

De los gráficos anteriores, se pueden discriminar los rangos de dispersión respecto a la media, teniendo en el caso del factor granulométrico una amplitud muy

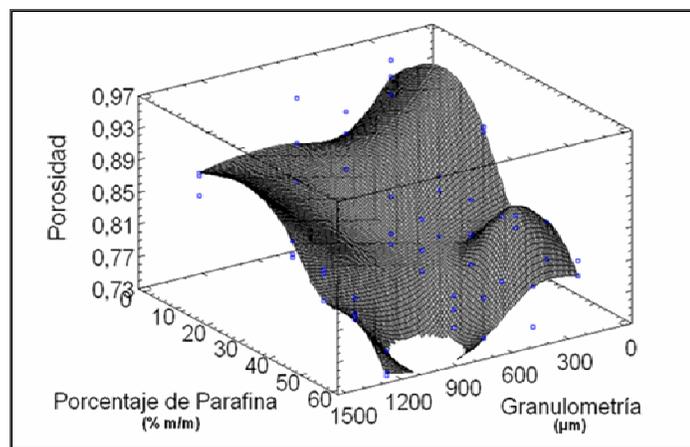
alta en comparación al porcentaje de cera; no obstante el reporte del análisis estadísticos indica que ambos factores son estadísticamente significantes al 95% de confianza (anexo A.1); sin embargo, el estudio de los gráficos de media apunta a la posibilidad de contemplar en futuros trabajos otras variables con efecto estadístico como la morfología, si se desea discernir mejor los factores que afectan la densidad del lecho y desarrollar ecuaciones de predicción. La tabla 3,9 permite completar la lectura estadística indicando que la desviación estándar entre los ensayos se encuentra por debajo del 2%, demostrando la repetitibilidad de los resultados mediante el método aplicado.

#### **4.1.3 Porosidad de lecho**

Siendo la porosidad un factor fundamental en el estudio y operación de los sistemas de lecho adsorbente, es necesario conocer el efecto de los factores manipulables durante la formulación del lecho de partículas. Para ello se construyó una superficie de respuesta, figura 4.5, donde se reitera el efecto marcado del porcentaje de parafina sobre la propiedad evaluada, justo como en el apartado anterior; identificándose para este caso, una relación decreciente entre la variable dependiente e independiente.

Abstrayendo la definición de porosidad como la fracción del volumen vacío respecto al total, puede presumirse que la parafina abarca tales espacios, transgrediendo el recubrimiento hasta cierto punto de llenado o taponamiento de los espacios vacíos y canales en las partículas. Por otra parte, se percibe en la superficie que las pendientes de las lomas formadas a los extremos del porcentaje de cera se vuelven más abruptas a medida que se reduce la granulometría, esto indica que las

partículas de menor diámetro están siendo afectadas más sensiblemente por la cantidad de cera hidrofobante. Los valores promedios de porosidad compilados en la tabla 3.8 varían entre 0,8202 y 0,9281, aunque para estos ensayos la desviación estándar calculada se encontró un tanto mayor que para la densidad, en general no supera el 5% (tabla 3.9), lo que no descalifica el método si se mantiene una tolerancia inferior al 10 % de desviación.

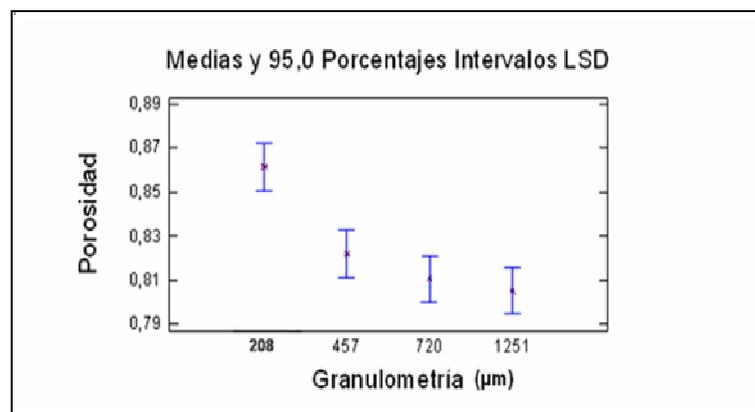


**Figura 4.5 Superficie de respuesta de la porosidad de lecho respecto a la granulometría y el porcentaje de parafina hidrofobante.**

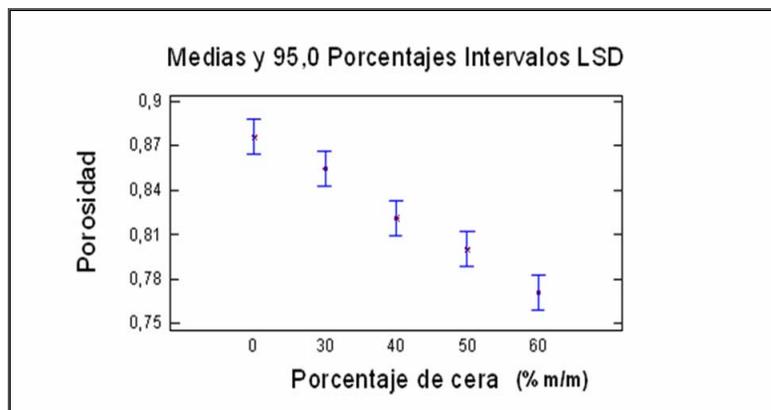
El reporte del ANAVA aplicado a los datos de porosidad respecto a porcentaje de cera y granulometría indican la significancia estadística para ambos parámetros sobre la variable de respuesta al 95 % de confianza (anexo A.2), mientras que los gráficos de media en las figuras 4,6 y 4.7 revelan con más claridad la relación entre la porosidad y cada factor; notándose que en ambos caso la proporcionalidad es inversa.

En función de la granulometría, el comportamiento parece tener una tendencia exponencial, y más evidente para el porcentaje de parafina que puede definirse muy bien como una linealidad. Los resultados refuerzan la hipótesis del llenado planteada anteriormente, puesto que la figura 4.7 indica una disminución constante de la porosidad al incrementarse la composición de parafina, dado siendo posible en segundo lugar una expansión o hinchamiento de la partícula, lo que contradiría los resultados de la figura 4.4, al implicar un aumento de volumen y por tanto una disminución en la densidad.

La manera en la que la granulometría afecta la porosidad de material puede presumirse tomando en cuenta la naturaleza del mismo, estando conformada la estructura del bagazo eminentemente por fibras y restos de las paredes celulares, [7] que originalmente se hallaban aglomeradas entre sí, al dividirse en fracciones de menor diámetro, estas cápsulas también deben romperse y en tanto más se divide se lógico que más cápsulas se rompan dejando expuesto el espacio vacío dentro de ellas.



**Figura 4.6** Gráfico de medias de la porosidad del lecho respecto a la granulometría.



**Figura 4.7 Gráfico de medias de la porosidad del lecho respecto al porcentaje de cera.**

#### **4.1.4 Morfología de las partículas**

Las figuras 4.8 a 4.11 muestran el registro micrográfico de las diferentes fracciones granulométricas sin hidrofobar. Las imágenes indican la diversidad de formas de las partículas, pero esencialmente se diferencian dos tipos de partículas, tal como lo indica la bibliografía: las amorfas constituidas por los remanentes de las paredes celulares del tejido medulas, y las fibrosas más parecidas a hebras, que formaron en su momento la corteza; [7] estas últimas de diámetro y longitud diverso como se aprecian en las figuras 4.9 y 4.10. Destacándose además, que son apenas visible en la toma i de la figura 4.11 donde se aprecian tales estructuras. No significa esto que algunas fracciones granulométricas carezcan de material fibroso, notándose su presencia en todas las fracciones granulométricas usadas.

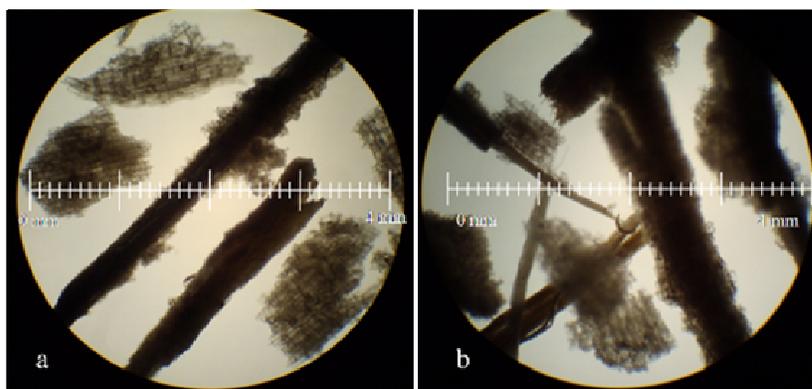


Figura 4.8 Micrografía de partícula (1.251  $\mu\text{m}$ ) imagen ampliada 4 veces.

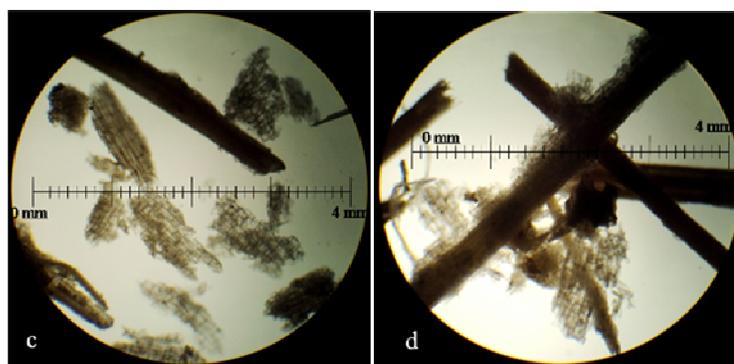
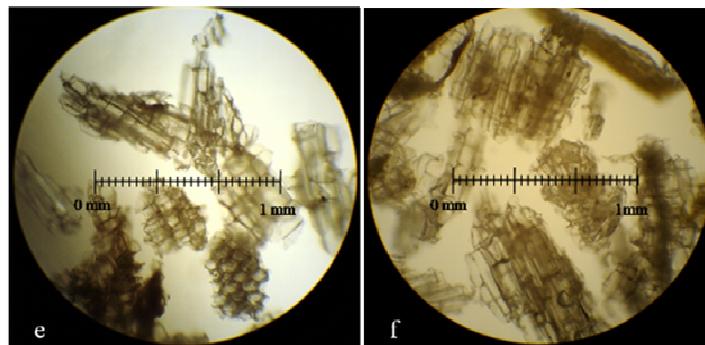
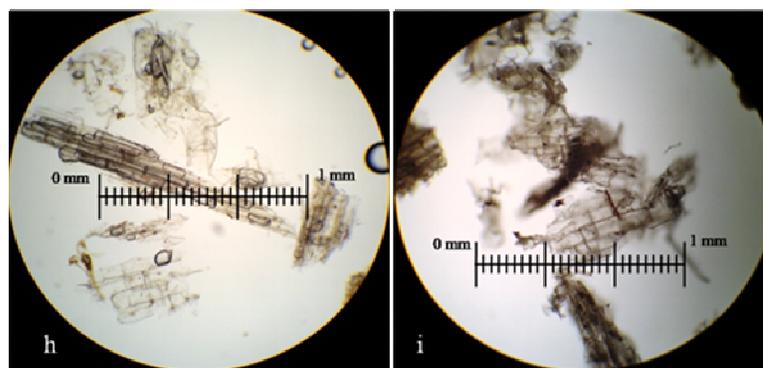


Figura 4.9 Micrografía de partícula (720  $\mu\text{m}$ ) imagen ampliada 4 veces.



**Figura 4.10** Micrografía de partícula (457  $\mu\text{m}$ ) imagen ampliada 10 veces.



**Figura 4.11** Micrografía de partícula (208  $\mu\text{m}$ ) ampliada 10 veces.

Para realizar un estudio estadísticamente válido de la distribución de tales morfologías respecto al diámetro promedio de partícula, sería necesario analizar un número mayor de muestras o realizar conteos manuales; a pesar de ello, no pierde validez la aproximación de que las fracciones de mayor tamaño presentan una proporción más elevada de material fibroso.

Enfocando la atención en el material granular, las tres primeras granulometrías se muestran en general algo alargadas y con centros más dilatados que los extremos, siendo demasiado variables como para equipararlas a cilindros u ovoides, en tanto que la granulometría más fina (208  $\mu\text{m}$ ) exhibe una deformidad mayor, donde la estructura celular parece desmenuzada casi por completo.

En la figura 4.10 se aprecia mejor las estructuras celular en forma de prismas hexagonales, alrededor de 300  $\mu\text{m}$  de largo y 100  $\mu\text{m}$  de diagonal, acoplados como bloques longitudinalmente y transversalmente como panal de abejas. Tales características coinciden con la presunción realizada en el apartado anterior respecto al efecto de la granulometría sobre la porosidad.

Observando las imágenes desde la figura 4.8 hasta la 4.11 se nota que al fraccionarse el conglomerado de poliedros, se exponen cada vez más la estructura interna de los bloques. Aumentado el acceso a los espacios vacíos. Esto podría explicar el aumento casi exponencial de la porosidad con la disminución del diámetro de partícula, en un extremo las partículas medulares retenidas por la malla 20, podrían no dar acceso a los bloques internos del conglomerado, dado que la pared celular es una estructura rígida y semipermeable; mientras que en el otro extremo el bagacillo (208  $\mu\text{m}$ ) prácticamente está constituido por cascarones de pared celular, o conjuntos de bloque totalmente expuestos, lo que aumenta drásticamente el volumen vacío respecto al volumen de partícula.

Tales conjeturas llevarían a diferenciar la percepción común de porosidad, producto de un conjunto de canales tortuosos, con respecto a los espacios vacíos en

forma de concavidades o accesos a la estructura interna de la pared celular, propia del bagazo.

#### **4.2. efecto del porcentaje de parafina y DE LA granulometría de las partículas de bagazo hidrofobado, sobre la cantidad de aceite separado de una emulsión O/W sintética**

Aplicando las diferentes formulaciones preparadas en los ensayos de tratamiento discontinuo, se estudió el efecto sobre la remoción de hidrocarburos, usando un diseño experimental de 5 niveles para el factor porosidad y 4 para el factor granulometría, realizando 2 repeticiones.

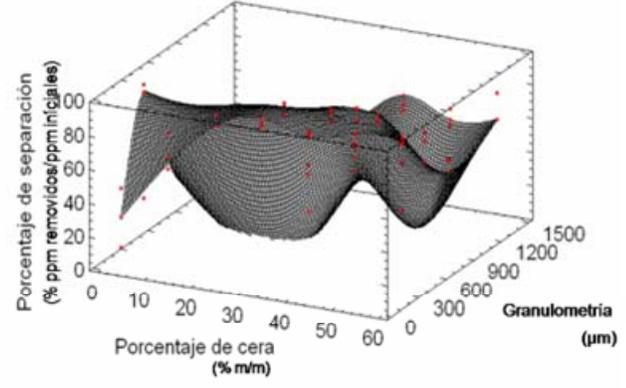
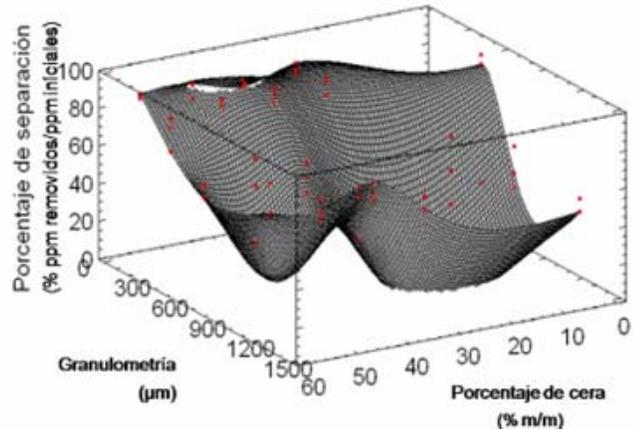
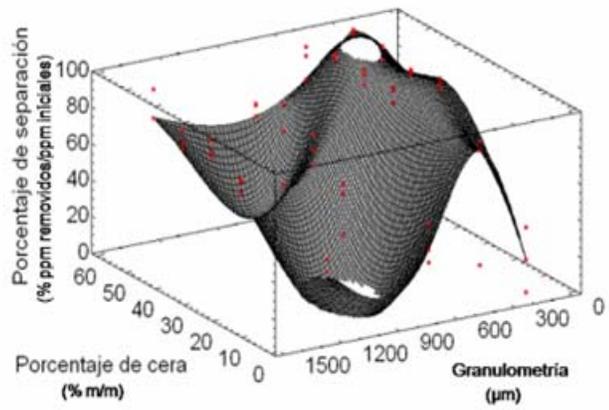
Guzmán [23] reporta que el valor de diseño para el efluente del separador API en una planta de tratamiento de aguas residuales es de 500 ppm de grasas e hidrocarburos. Por lo que se puede considerar como una condición del afluente en la unidad de tratamiento fisicoquímico. Atendiendo a lo anterior, se optó por utilizar esta concentración como patrón de las pruebas, haciendo referencia a un valor manejado en el tratamiento de efluentes de la industria petroquímica nacional. Los resultados del estudio se muestran como superficie de respuesta, figura 4.12.

Respecto a la granulometría, en la figura 4.12 se observa que los máximos porcentajes de remoción se obtienen en la cumbre ubicada entre 200 y 600  $\mu\text{m}$ . En las perspectivas (c) y (b) es evidente que para este rango granulométrico el porcentaje de remoción es prácticamente independiente al contenido de parafina. Tal resultado es esperado teniendo en cuenta que la hidrofobación se trata de la modificación de una propiedad superficial, puesto que solo las moléculas en contacto con el sistema

bifásico (aceite/agua) tienen actividad superficial, el agente hidrofobante en este caso la cera, podría permanecer en exceso engrosando la cobertura; una vez se alcance un recubrimiento homogéneo del plano.

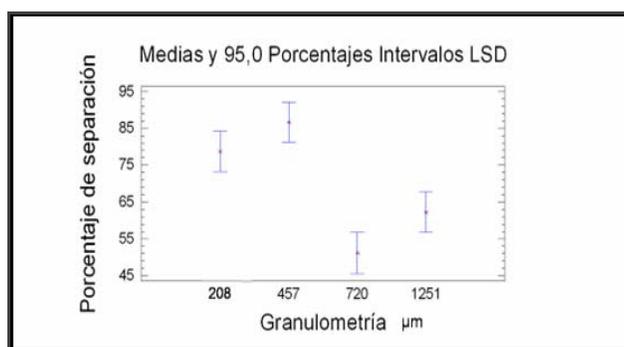
El comportamiento mostrado permite presumir que la granulometría óptima se ubica alrededor de 300  $\mu\text{m}$ . Conviene acotar que este resultado no coincide con la granulometría de máxima porosidad (208  $\mu\text{m}$ ); de hecho, al observar el extremo inferior del eje granulométrico, se divisa al pasar la zona de mayor rendimiento una inversión en el comportamiento, reduciéndose la eficiencia al disminuir el diámetro de partícula; la vista (a) de la figura 4.12 ofrece un enfoque de la reducción abrupta en la capacidad de remoción para la menor granulometría con 0% de cera.

Por encima de los 900  $\mu\text{m}$ , el contenido de cera adquiere mayor relevancia, mostrándose mejor en (b), el efecto positivo que genera la parafina sobre la remoción de hidrocarburo, al incrementarse la granulometría. No obstante, sobrepasados los 900  $\mu\text{m}$ , la respuesta obtenida es con mucho inferior a la zona de máximo rendimiento. Por otra parte los mecanismos o factores que determinan la formación de singularidades como, los 2 valles en el área central del gráfico y la depresión intermedia entre 900 y 1.200  $\mu\text{m}$ , no se hallan muy claros; en revisión de la tabla 3.21, se tiene en líneas generales desviaciones inferiores al 10%, excepto en las zonas de singularidad donde los valores de remoción caen vertiginosamente, es posible que la incertidumbre generada por alguna circunstancia de trabajo afectara los resultados en esas zonas del gráfico alterando el comportamiento.

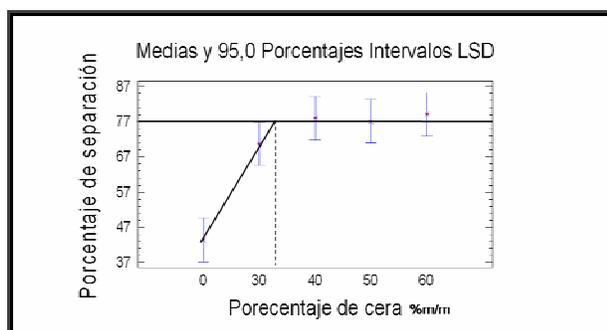


**Figura 4.12 Perspectivas de la superficie de respuesta del porcentaje de remoción de hidrocarburos respecto a la granulometría y el porcentaje de parafina.**

En el anexo A.3 el análisis de la varianza indica que tanto el factor granulometría como el porcentaje de cera tienen significancia estadística al 95% de confianza sobre la separación de hidrocarburo. Las figuras 4.13 y 4.14, facilitan la selección de las mejores características para la remoción de hidrocarburos lo que constituye el objeto preponderante de esta fase, afín de continuar la investigación manteniendo fija la mejor formulación; como lo indica el gráfico y se corrobora en la tabla 3.20, los mejores valores de separación se adjudican a la fracción de 457 $\mu\text{m}$ , oscilando entre 83,85% y 94,98% de remoción.



**Figura 4.13 Gráfico de medias de la separación de hidrocarburo respecto a la granulometría.**



**Figura 4.14 Gráfico de medias de la separación de hidrocarburo respecto al porcentaje de cera.**

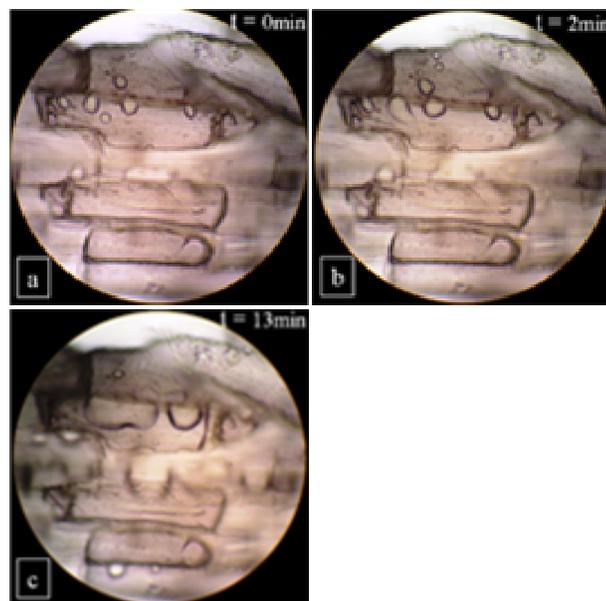
Por otra parte mediante la figura 4.14 se corrobora que al hidrofobar con parafina, parece existir una condición o “punto de recubrimiento”. Tal composición de parafina representaría en teoría, la necesaria para cubrir la superficie disponible al contacto como se explicó anteriormente. Es lógico aproximar esta concentración al interceptar la línea de tendencia para los primeros puntos, con la horizontal que corte el valor tope del porcentaje de separación para el gráfico, la abscisa del punto de intercepción debe representar la composición mínima de cera para obtener la máxima respuesta en el porcentaje de separación para este sistema.

Como se puede notar en la figura 4.14 se operó el procedimiento planteado, obteniendo una composición no muy diferente al 30% de cera. En atención al factor económico, se decidió continuar la investigación con la formulación de partícula hidrofobada, con 30% en masa de cera y 457  $\mu\text{m}$  de diámetro promedio.

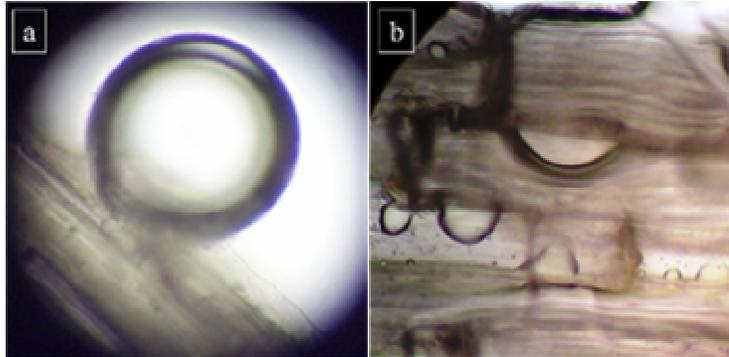
La serie de imágenes en la figura 4.15 se tomó luego de poner en contacto las partículas con una dispersión de 500 ppm de hidrocarburos mediante agitación, bajo

el esquema de trabajo del apartado 3.3. Las micrografías muestran el proceso de coalescencia de las gotas adheridas a la superficie. Tal como se supuso anteriormente, son las concavidades, pliegos y zanjas remanentes de la estructura celular las que ofrecen una superficie de adsorción para las gotas de aceite.

En la imagen de la figura 4.16 se contrasta la adsorción sobre las partículas fibrosas y los gránulos medulares, mientras que en las fibras (a) las gotas apenas se posan sobre la superficie, en los gránulos el aceite moja a tal punto la superficie que se extiende sobre la misma perdiendo en ocasiones su forma de casque esférico.

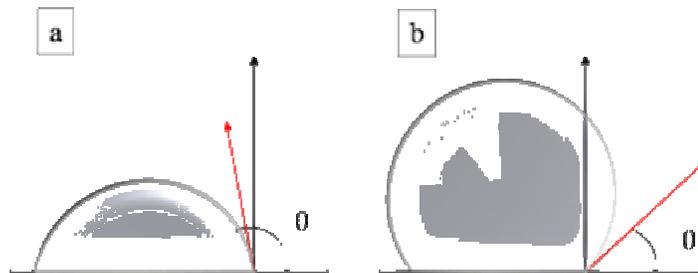


**Figura 4.15 Evolución temporal de una muestra de partícula hidrofobada (457  $\mu\text{m}$  y 30% de cera), extraída de tratamiento discontinuo.**



**Figura 4.16 Humectación del material fibroso y granular: (a) gota de kerosén sobre material fibroso. (b) gotas de kerosén sobre material granular.**

Lo anterior hace presumir que usando bagazo hidrofobado, el proceso de adsorción ocurre realmente en el material granular, esto en base a las implicaciones energéticas relacionadas al área de contacto, dado que, mayor área mojada implica un mayor trabajo de adhesión, como se muestra en la figura 4.17.



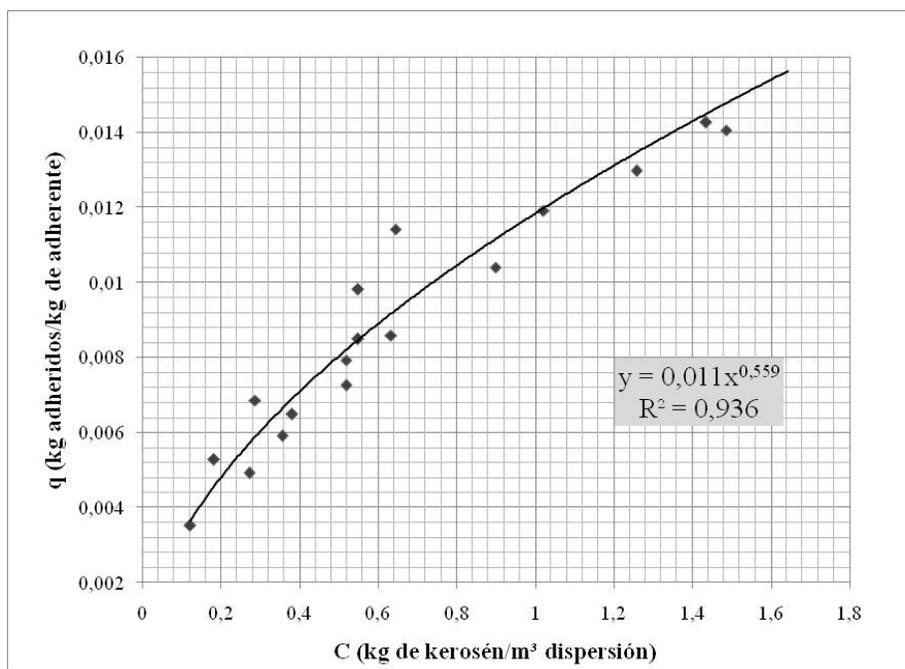
**Figura 4.17 Ángulos de contacto del aceite respecto a la mojabilidad: (a) Superficie hidrófoba (b) Superficie hidrófila.**

Aunque la figura 4.17 es un modelo sencillo como para aplicarse a medios porosos [13], permite comprender las implicaciones de interface, Cuando una superficie es hidrófoba (a) las gotas de aceite tienen la tendencia a "pegarse", es decir, a adherirse a la superficie sólida. Es obvio que la probabilidad de despegue o de arranque de una gota en un medio agitado es mucho menor si esta gota cubre una mayor superficie (a) que si presenta un menor ángulo de contacto (b).

Aunque en la figura 4.16 ambas partículas proceden de la misma muestra hidrófoba, se puede suponer que el contacto sobre la fibra es menor por las características de su superficie, esta fracción del material induciría a la coalescencia, [13] pero a medida que aumentasen de tamaño las gotas posiblemente se dependería de la superficie debido a la fuerza boyante superaría al trabajo de adherencia, mientras resultaría más difícil separar una gota con mayor contacto como se muestra en la figura 4.16 (b).

### **4.3 Modelo Matemático para el proceso de Adhesión**

De la tabla 3.22 se seleccionaron los valores que reportaron la mejor tendencia, reduciendo la dispersión de puntos y construyendo de esta manera la figura 4.18.



**Figura 4.18** Modelo matemático para los datos experimentales de adhesión.

Partiendo de las características mostradas en las figuras 4.15 y 4.16, se descarta el proceso de adsorción molecular como mecanismo de tratamiento. Se observa que la remoción de hidrocarburos utilizando bagazo hidrofobado parece obedecer a un proceso de adhesión, lo que concurre en la formación de películas de la fase aceite sobre las superficies del bagazo. En la figura 4.18 se plantea un ajuste potencial de los datos experimentales para el proceso de adhesión, con un factor de correlación del 0,936.

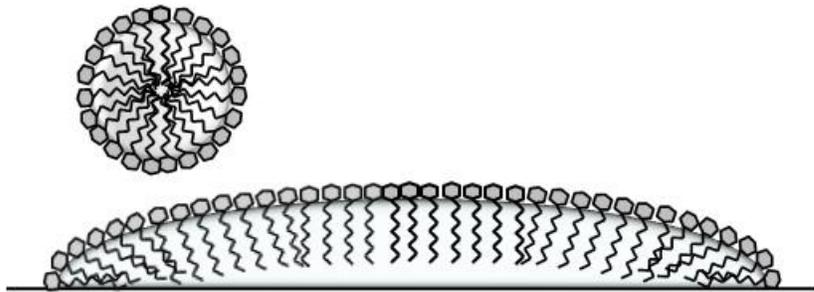
De la figura 4.18 se extraen los valores de las constantes propuestas para el modelo, correspondientes a 0,011 y 0,559 para el coeficiente y el exponente respectivamente. El modelo podría interpretarse en primera instancia, considerando que la consecución de puntos representan las máximas cantidades de masa oleosa aceptada por adhesión sobre la superficie, el resto del hidrocarburo debe quedar disperso en el medio fluido. Para sustentar el modelo matemático junto a sus implicaciones, se plantea a continuación un posible mecanismo físico para el fenómeno:

- a. Ocurre un **“acercamiento”** de las gotas desde el seno del fluido hasta la superficie del bagazo, reduciendo su energía cinética a medida que se acercan por efecto de la reducción en la velocidad de arrastre. [25].
- b. El **“contacto”** con la superficie puede general dos escenarios. En el primero una repulsión o choque elástico y en según la adhesión. [25]
- c. La adhesión implicaría la **“adsorción física”** de alguna de las moléculas de la gota a la superficie; debe recordarse que existen afinidades naturales entre la superficie (hidrofoba) y el aceite disperso. Según lo estipulado por la teoría de la superficie divisoria de Gibbs, la *concentración de exceso superficial*,  $\Gamma$ , se define como la cantidad de exceso de superficie por unidad de área, propiedad termodinámica que satisface la adsorción [26] y es característica de los compuestos altamente porosos. Aunque el adsorbato no se encuentra disuelto sino disperso, los convencionalismos moleculares y atómicos de la adsorción se respetan siempre que se considere a la gota como una partícula compuesta por moléculas, de las cuales algunas se adsorberán y otras se mantendrán ligadas por efecto cohesivo.

- d. La gota adsorbida es capaz de “*mojar la superficie*”, hasta donde el coeficiente de expansión basado en los esfuerzos tensores lo permitan, por tanto, la variación del área de contacto O/S se detendrá, cuando se alcance el valor de  $\theta$  que satisface la ecuación de Neuman y se establece el equilibrio entre los vectores de la energía libre de cada interface sobre el punto de contacto trifásico. [16]
- e. La “*nucleación*” debe ser el paso que se observa en las imágenes (a) y (b) de la figura 4.15, por la llegada y adición de más gotas a las previamente adheridas, estos son los núcleos de las gotas isla. [27]
- f. El paso anterior conlleva al “*crecimiento de isla*” descrito por el modelo de Vollmer-Weber [25,27]. Donde resulta lógico pensar que existen por lo menos dos factores que impulsan el contacto y correspondiente coalescencia entre las islas. Por un lado, la adición de nuevas gotas que al apiñarse y unirse explican la extensión en el área de las mismas [27]. Por otro las fuerzas de atracción laterales entre las gotas vecinas por efecto de las fuerzas de London y Van der Wall.
- g. Finalmente la “*coalescencia y formación de películas*” la figura(c) 4.15 muestra el punto en el que las gotas pierden su identidad y forma hemisférica, expandiéndose como película que moja la superficie. [27]

Observando la película de la figura 4.15 (c), pareciera crecer de forma lateral o perimetral, extendiéndose sobre el plano; por tanto puede esperarse que la fuerza necesaria para separa la gota adherida sea tal, que la fuerza boyante debida a la diferencia de densidad, no sea capaz de equipararla; puesto que el trabajo de adhesión se realiza por unidad de área mojada [16]. Por último, no cuesta imaginar que tal como el surfactante acciona sobre la interface O/W para estabilizar las gotas en la dispersión; puede colocarse en la interface de la película adherida, generando

repulsiones estéricas debidas a las estructuras ramificadas del SPAN 80 (figura 4.19). En conjunto estos efectos evitarían la adhesión de gotas desde el seno del fluido sobre la película, permitiendo que ocurra esencialmente un crecimiento perimetral, lo que contribuye a las fuerzas adhesivas por encima de las cohesivas. El planteamiento satisfecería los elementos básicos del mecanismo de adhesión propuesto.



**Figura 4.19 Surfactante ocupando interface O/W.**

#### **4.4 prueba del montaje experimental para ensayo de lecho fijo con bagazo hidrofobado**

En la figura 4.19 se muestra el montaje propuesto para realizar el ensayo de lecho fijo con bagazo hidrofobado.



**Figura 4.19 Montaje experimental para el estudio del tratamiento de aguas aceitosas en lecho fijo de partículas hidrofobadas.**

Se sabe que la capacidad de adsorción determinada en ensayos discontinuos en condiciones de equilibrio no puede aplicarse a la operación en columnas. La única forma segura de diseñar un sistema de adsorción es llevando a cabo ensayos a escala semi-piloto bajo condiciones similares a las de operación a escala real.[16]

Manejando los datos recabados a lo largo del trabajo, se establecieron diferentes parámetros operacionales para el sistema experimental propuesto, figura 4.21, constituyendo de esta forma una aplicación directa del conocimiento adquirido hasta ahora. A fin de verificar su viabilidad, se construyó el montaje para el tratamiento de agua aceitosa en una columna empacada con partículas hidrofobadas de bagazo; innovando no sólo en el material de relleno, sino en la posibilidad de combinar el estudio del tiempo de operación del lecho con el comportamiento del flujo en tránsito; ambos fundamentales para el escalamiento de este tipo de operación unitaria.

La propuesta ofrece la ventaja de manipular simultáneamente factores determinantes tanto en la operación de transferencia de masa como en el transporte de

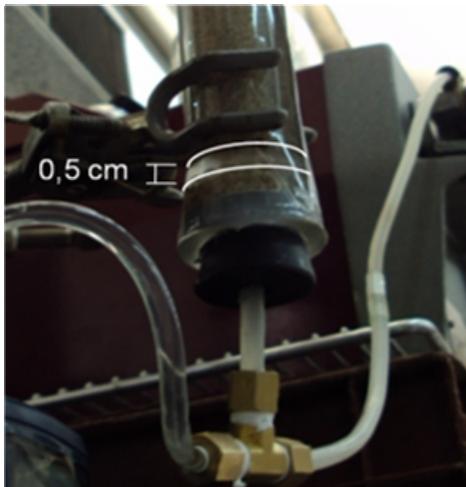
fluido, entre éstos se cuenta con la tasa de alimentación, grado de contaminación, porosidad y densidad de partícula, y con modificaciones menores las dimensiones de la misma columna.

Se seleccionó como lecho, para el ensayo, la formulación de 30% de parafina y un diámetro de 457  $\mu\text{m}$  de partícula, cuya densidad y porosidad se ubican en las tablas 3.5 y 3.8. Las dimensiones de la columna utilizada permiten obtener una relación entre el diámetro de la columna y el diámetro de partícula (2,54 cm/0,0257 cm) superior a 50, que permitiera evitar los efectos de pared y la formación de canalizaciones. [24]

En relación a esto último y aún cuando se tomaron la previsiones necesaria en el diseño como se explicó antes, la inyección superior tuvo que descartarse debido a la canalización severa entre las paredes de la columna y el lecho; es posible que la poca permeabilidad del lecho (hidrófobo) respecto a la fase continua del fluido (acuosa), aunado a la resistencia natural del fluido a transitar por un camino tortuoso, influyeran en la circulación selectiva del líquido al pasar por la columna.

En cambio, las pruebas con inyección inferior, figura 4.20, demostraron mejores resultados en relación a la humectación del lecho, con la gravedad en contra el fluido tardó mucho más en salir de la columna, puesto que se vió obligado a pasar por el lecho, humedeciéndolo aparentemente por completo. A diferencia del caso anterior, se manifestó un tiempo de contacto con el lecho vacío entre 8 y 10 min antes de tener caudal de salida; es de mencionar que la humectación del lecho es visualmente apreciable, puesto que el lecho seco pasa de un color claro a un tono más oscuro al humedecerse.

Para simular un tiempo de contacto se trabajó a la altura inicial de lecho de 26,5 cm, aunque las investigaciones con carbón activado señalan un porcentaje de expansión o hinchamiento [25], en este caso se produjo el fenómeno contrario, la altura del lecho resultó menor durante la operación, este fue empujado hacia arriba por el fluido y al comprimirse redujo su altura aproximadamente en 0,5 cm reduciendo su volumen en 2%, lo que se evidencia en la figura 4.20, en la tabla E.1 del anexo E se presentan las propiedades físicas para diferentes lechos adsorbentes, como se observa la densidad seca aparente de tales materiales es en todos los casos un orden de magnitud superior a la del bagazo hidrofobado; es posible que la baja densidad del lecho y su poca afinidad a la fase fluida, en conjunto generasen una fuerza boyante a tal magnitud, que superó la posible expansión del lecho debida a la oclusión de líquido entre los canales y cavidades.

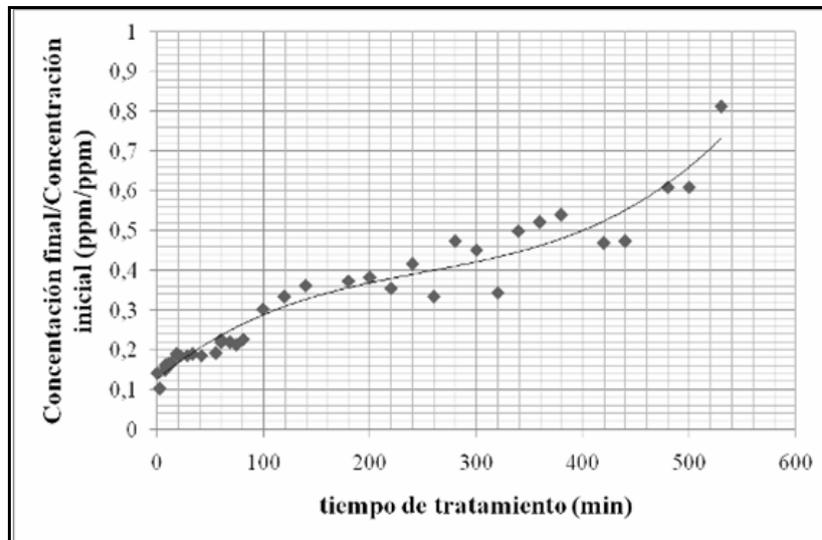


**Figura 4.20 Nivel de líquido bajo el lecho.**

El tratamiento se estudió mediante la figura 4.23, construida por medio de los valores compilados en la tabla 3.23. El tiempo de espera para agotar casi totalmente la capacidad de adsorción del lecho fue de 9 h, aunque luego de los primeros 100 min de tratamiento la remoción ya era inferior a 70%, no significando esto un resultado desalentador, puesto que el nivel de contaminación manejado para el diseño de columnas de adsorción es de 2 a 20 ppm [22, 28-29], en cambio en este estudio la concentración inicial se ubicó en 500 ppm.

Lo anterior podría explicar la diferencia entre el gráfico experimental, figura 4.23, y el propuesto en la figura 2.41. Pueden identificarse por lo menos 2 zonas de cierta estabilidad en la concentración de salida: entre 0 y 100 min la concentración del efluentes se mantiene alrededor del 20% de la inicial, luego entre 100 y 300 min oscila en 0,36; a partir de las 5 h se observa el rápido ascenso en la concentración de salida. Teniendo en cuenta el nivel de contaminación del afluente y en base al corto tiempo de operación para tratamiento con lecho fijo, [22] se descarta que la propuesta del lecho fijo de bagazo hidrofobado tenga aplicación a nivel de tratamiento secundario, por lo que son necesarios más análisis, bajo la condición de tratamiento terciario de efluentes.

Es importante dejar en claro que el nivel de esta prueba fue exploratorio, dado que hasta ahora se esclarecen los mecanismos implicados en el proceso de tratamiento con bagazo hidrofobado así como su alcance el alcance del mismo.



**Figura 4.21 Evolución respecto a al tiempo de la concentración del efluente en columna empacada con bagazo hidrofobado.**

No se pase por alto el hecho de haber obtenido en las pruebas por cargas eficiencias por encima del 90% para la misma condición de concentración, es necesario por ende evaluar con más detenimiento la posibilidad de aplicar este tratamiento bajo operación discontinua, operación común en el tratamiento de agua con agentes adsorbentes para los cuales tiene valides al modelo potencial planteado para el proceso de adhesión.[16]

Respecto al bombeo del afluente, aunque el uso de la bomba peristáltica se encuentra ampliamente difundido en este tipo de experiencias [28,29] dificulta la medición de la caída de presión en el lecho generando ruido en la medición por efecto de la fluctuación en el impulso, esto se percibe mejor en la figura 4.24.

La figura anterior es producto del análisis la regresión lineal entre la caída de presión y el tiempo de operación, presentando el reporte en el anexo A.4, el mismo indica al 90% de confiabilidad que la variable tiempo no tiene efecto sobre la caída de presión. Para determinar el valor medio en la caída de presión es necesario implementar un manejo de datos estadísticos que reduzcan el ruido en la variable de respuesta.

Los resultados arrojados hasta ahora permiten descartar los diferentes esquemas bajo los cuales actuarían las partículas hidrofobadas de caña en la remoción de hidrocarburos. La observación microscópica ilustra el fenómeno de adsorción y coalescencia. Por su parte, el estudio de adsorción reveló un comportamiento isotérmico para una fisisorción; en último lugar se tiene que la independencia entre la caída de presión en el lecho y el tiempo de operación a caudal constante conlleva a pensar que este sistema no funciona como filtro coalescente, puesto que la coalescencia de glóbulos de aceite en un medio poroso incorporarían al sistema una caída de presión por capilaridad según el modelo de Laplace, como se observa en la figura 4.25.

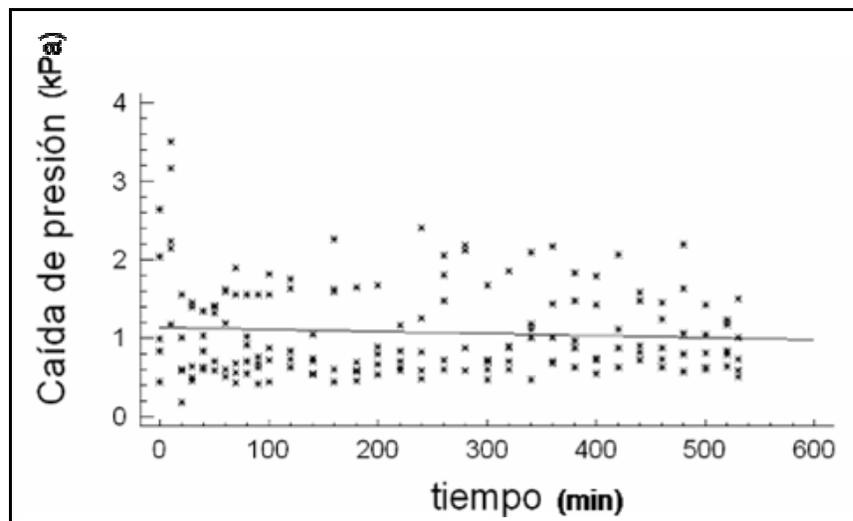


Figura 4.22 Caída de presión en el lecho respecto al tiempo de operación.

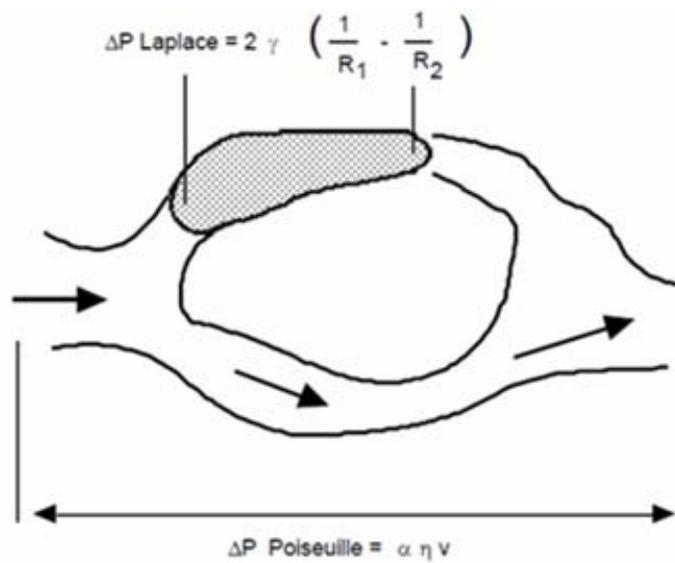


Figura 4.23 Entrampamiento capilar de un glóbulo de aceite desconectado.[30]

Este fenómeno es típico en yacimientos bajo recuperación secundaria, en los que se desprenden glóbulos oleosos de la roca, y se desplazan con el agua de inyección, [30] al no generarse un incremento de la presión es lógico pensar que tal fenómeno no se lleva a cabo.

#### 4.5 Conclusiones

1. Entre 200  $\mu\text{m}$  y 1.200  $\mu\text{m}$  la relación entre el diámetro de partícula de bagazo y la fracción másica es creciente en el rango de 0% a 30% en masa.
2. La relación entre la densidad y el porcentaje de parafina hidrofobante es directamente proporcional, ocurriendo lo opuesto respecto al factor granulometría, con un nivel de confianza del 95%.
3. Los valores promedios de densidad de lecho se encuentran entre 0,0564 g/ml y 0,0954 g/ml, con desviaciones estándar menores al 2%.
4. La porosidad del lecho de bagazo hidrofobado es inversamente proporcional al contenido de parafina y a la granulometría, con un nivel de confianza del 95%.
5. Los valores promedios de porosidad varían entre 0,8202 y 0,9281, con una desviación estándar en general inferior al 5%.
6. La estructura medular esta forma por estructura celular en forma de prismas hexagonales, de aproximadamente 300  $\mu\text{m}$  de largo y 100  $\mu\text{m}$  de diagonal, acoplados como bloques longitudinalmente y transversalmente como panel.

7. En experimentos de remoción discontinua, se demostró estadísticamente que la granulometría y el porcentaje de cera son factores influyentes sobre el porcentaje de separación de hidrocarburo al 95% de confianza.
8. los mejores valores de separación se adjudican a la fracción de  $457\mu\text{m}$ , oscilando entre 94,98% y 83,85% de remoción discontinua.
9. Gráficamente se determina que las características óptimas de partícula para usar como medio de separación son, 33% cera y  $300\mu\text{m}$  de diámetro promedio.
10. La morfología de las partículas afecta el ángulo de contacto y la mojabilidad de la fase oleica, teniendo preferencia a humectar las paredes celulares de los gránulos y apenas posándose sobre las fibras
11. Se produce la coalescencia entre las gotas adsorbidas posiblemente debido a las fuerzas de atracción molecular.
12. Los resultados variando la concentración inicial de kerosén en operación discontinua, se ajustan a un modelo potencial, estimándose el coeficiente y el exponente en 0,011 y 0,559 respectivamente.
13. El montaje experimental permitió recopilar data válida para el estudio de la operación de tratamiento con lecho fijo de bagazo hidrofobado, en relación a al tiempo de operación y el flujo y la dinámica el lecho.
14. En la operación continua con lecho de partículas hidrofobadas de  $457\mu\text{m}$  y 30% de cera se obtuvo una remoción máxima de 85,68% de hidrocarburo.

15. La caída de presión resulto estadísticamente independiente del tiempo de operación con un 90% de confianza para la operación en lecho continuo.

## 4.6 Recomendaciones

1. Indagar en métodos de mezclado práctico y de aplicación industrial que aseguren el recubrimiento de las partículas.
2. Realizar pruebas con bagazo sin tratamiento, obtenido directamente del proceso de producción, lo que permita reducir requerimientos de lavado y costos de conservación.
3. Profundizar en la comprensión del fenómeno de interface, junto con las implicaciones termodinámicas y fisicoquímicas del mismo.
4. Modelar la partícula medular de bagazo utilizando programas simuladores fluidos.
5. Plantear opciones para la disposición final del lecho.
6. Estudiar efecto de agentes microbianos sobre las partículas de bagazo y la vida útil del lecho.
7. Probar eficiencia de tratamiento utilizando otros hidrocarburos dispersos.
8. Realizar ensayos en columna de adsorción bajo concentraciones iniciales entre 2 y 20 ppm.

9. Completar estudio de la dinámica del fluido atravesando el lecho con pruebas de caída de presión respecto al caudal y altura del lecho.
10. Investigar las alternativas y condiciones de secado óptimos para el bagazo de caña.
11. Eliminar el uso de platos porosos en la parte superior de la columna.
12. Intentar el diseño y práctica a escala semi-piloto de un sistema por etapas para tratamiento de aguas aceitosas empleando un lecho adsorbente de bagazo hidrofobado.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Kemmer F. y McCallion J., “Manual del Agua: Su naturaleza, tratamiento y aplicaciones”. Tomo I y II. Primera edición, Nalco, McGraw Hill, Ciudad de Mexico, México (1998).
2. Arboleda J., “Teoria y Practica de la Purificación del Agua”, Tomo I, tercera edición, McGraw Hill, Colombia (2000).
3. Dezhi S., Chung J., Xiaodong D. y Ding Z., “Demulsification of water-in-oil emulsion by wetting coalescence materials in stirred- and packed-columns”. *Colloids and Surfaces*. Volumen 150, N° 6, 69-75, (1999).
4. Speth H., Pfennig A., Chatterjee M. y Franken H., “Coalescence of secondary dispersions in fiber beds”. *Separation and Purification Technology*, Vol. 29, 113–119 (2002).
5. Villarroel J., “Estudio de la biorremediación de suelos afectados con hidrocarburos utilizando lechos empacados”. Tesis de Grado, Escuela de Ingeniería y Ciencias Aplicadas, UDO, Barcelona, Venezuela (2003).
6. Chocron M., La Gamma A., Becquart E., Schonbrod B., “Sistema a escala de laboratorio para la purificación de aguas industriales contaminadas con hidrocarburos”. Presentado en el II Congreso de Hidrocarburos, organizado por el Instituto Argentino del Petróleo y del Gas, Buenos Aires, Argentina (2003).

7. Garnica A., Curbelo F., Oliveira E. y Neto E., “Remoción del petróleo del agua producida utilizando como adsorbente vermiculita expandida e hidrofobizada”. *Química Teórica y Aplicada*, Vol. 63, N°. 521, 35-39 (2006).
8. Kirk R. y Othmer D., “Enciclopedia de tecnología química”. Tomo III. Primera edición. UTEHA, Ciudad de México, México (1961).
9. Salager J., “Formulación, Composición y Fabricación De Emulsiones Para Obtener Las Propiedades Deseadas Estado Del Arte. Parte A: Introducción y Conceptos De Formulación Físico-Química”. Cuaderno N° S747-A, Versión 2, Laboratorio de Fenómenos Interfaciales, Reología y Procesos. Facultad de Ingeniería, ULA, Mérida, Venezuela (1999).
10. Venegas A. y Becerra J., “Determinación de la densidad de materiales con alta porosidad”. *Revista colombiana de Física*, Vol. 38, N° 4, 1399-1402 (2006).
11. Felder R. y Rousseau R., “Principios Elementales de los Procesos Químicos”. Tercera edición. Limusa Wiley, México (2005).
12. Salager J., “Granulometría Teórica”. Cuaderno FIRP S554-A. Versión 2. Laboratorio de Fenómenos Interfaciales, Reología y Procesos. Facultad de Ingeniería, ULA, Mérida, Venezuela (2007).
13. Salager J., “Adsorción y Mojabilidad”. Cuaderno FIRP S160A. Versión 2. Laboratorio de Fenómenos Interfaciales, Reología y Procesos. Facultad de Ingeniería, ULA, Mérida, Venezuela (1998).

14. Thompson C., "Stress evolution during Volmer-Weber growth of thin films". Dept. de Ingeniería y Ciencia de los Materiales, Instituto Tecnológico de Massachusetts, Cambridge, USA (2002).
15. Geankoplis C. "Procesos de transporte y operaciones unitarias". Tercera edición, Editorial C.E.C.S.A, México (1998).
16. Treybal R. "Operaciones de Transferencia de Masa". Segunda edición, McGraw Hill, México (1997).
17. Griskey R., "Transport Phenomena and Unit Operations a Combined Approach". John Wiley & Sons, Estados Unidos de América (2002).
18. Bird R., Stewart W. y Lightfoot. "Fenómenos de transporte". Segunda edición, Reverté S.A., México (2006).
19. Rouessac F. y Rouessac A., "Análisis Químico. Métodos y técnicas instrumentales modernas. Teoría y ejercicios resueltos" Mc Graw Hill, España (2003).
20. Buron H., Brunel L. y Snabre P., "New method for bottle tests to study petroleum emulsions using the Turbiscan technology". *4th International Conference on Petroleum Phase Behaviour and Fouling*, Trondheim, Norway (2003).
21. Shomaker D. y Garland C., "Experimentos de fisicoquímica" Uteha, México (1968).

22. Ramalho R., "Introduction to Wastewater Treatment Processes". Academic Press, Inc. New York, Estados Unidos de América (1977).
23. Guzman J., "Comportamiento operacional del sistema fisicoquímico de la planta de tratamiento de efluentes líquidos del terminal de almacenamiento y embarque de crudo Jose". Tesis de Grado, Escuela de Ingeniería y Ciencias Aplicadas, UDO, Barcelona, Venezuela (2000).
24. Ortiz A., Ramírez R. y Durán A., "Pruebas RSSCT con mini-columnas de carbón activado para remover materia orgánica natural (MON) presentes en aguas". Instituto de Ingeniería, UNAM, México, D.F. (2002).
25. Segura B., "Producción y caracterización de recubrimientos en multicapas de TiN/DLC en películas delgadas" Tesis de maestría en física, Facultad de Ciencias y Administración, Universidad Nacional de Colombia, Manizales, Colombia (2003).
26. Arias J., Paternina E. y Barragán D., "Adsorción física sobre sólidos aspectos termodinámicos". *Química. Nova*, Vol. 32, No. 5, pag. 1350-1355, (2009).
27. Thompson C., "Stress evolution during Volmer-Weber growth of thin films". Instituto Tecnológico de Cambridge, Departamento de Ciencia e Ingeniería de los Materiales, Massachusetts, USA (2003).
28. Ramírez R. y Durán A., "Remoción de olor y sabor de aguas naturales causados por endotoxinas: caso del 2-Metilisoborneol (MIB)". *AGUA LATINOAMÉRICA*, Vol. 6, N° 1, pag. 24-27 (2006).

29. Rivera M. y Piña M., “Tratamiento de agua para remoción de arsénico mediante adsorción sobre zeolita natural acondicionada”. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, México, D.F. (2005).
30. J. Salager., “Fenómenos interfaciales en dispersión polifásica y medios porosos”. Cuaderno FIRP N° S-122 N Versión 5, Laboratorio de Fenómenos Interfaciales, Reología y Procesos. Facultad de Ingeniería, ULA, Mérida, Venezuela (2002).
31. Perry R. y Green D., “Manual del ingeniero químico”. Vol. 3, Séptima edición, McGraw Hill, Madrid (2001).

## METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

TÍTULO	EVALUACIÓN DE LA INFLUENCIA DE ALCOHOLES EN LA ESPUMABILIDAD Y ESTABILIDAD DE UNA ESPUMA NO ACUOSA.
SUBTÍTULO	

### AUTOR (ES):

APELLIDOS Y NOMBRES	CÓDIGO CULAC / E MAIL
José A. Danglad F.	CVLAC: 18.666.918 E MAIL: <a href="mailto:jdanglad@gmail.com">jdanglad@gmail.com</a>
	CVLAC: E MAIL:
	CVLAC: E MAIL:
	CVLAC: E MAIL:

### PALÁBRAS O FRASES CLAVES:

Bagazo de caña \_\_\_\_\_

Hidrofibración \_\_\_\_\_

Adhesión \_\_\_\_\_

Lecho empacado \_\_\_\_\_

Tratamiento de aguas aceitosas \_\_\_\_\_

Sistemas dispersos \_\_\_\_\_

### METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

ÁREA	SUBÁREA
Ingeniería y ciencias aplicadas	Ingeniería Química


**RESUMEN (ABSTRACT):**

En esta investigación se realizó la aplicación de partículas hidrofobadas de bagazo de caña en el tratamiento de aguas aceitosas, examinando el efecto de la granulometría ( $\mu\text{m}$ ) y del porcentaje de parafina (% m/m) sobre la densidad y porosidad del lecho y en el porcentaje de remoción de hidrocarburos. Los valores de densidad de lecho oscilaron entre 0,0564 y 0,0954 g/ml, mientras que la porosidad varió entre 0,8202 y 0,9281. El mayor porcentaje de remoción se ubicó en 94,98% para la operación discontinua, correspondiendo a un diámetro promedio de partículas de 457  $\mu\text{m}$ .

**METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:****CONTRIBUIDORES:**

<b>APELLIDOS Y NOMBRES</b>	<b>ROL / CÓDIGO CVLAC / E_MAIL</b>				
<b>Marfisi Shirley</b>	<b>ROL</b>	<b>CA</b>	<b>AS X</b>	<b>TU</b>	<b>JU</b>

	CVLAC:	10.301.828			
	E_MAIL	<a href="mailto:shirleymarfisi@yahoo.com">shirleymarfisi@yahoo.com</a>			
	E_MAIL				
Cova Alexis	ROL	CA	AS	TU	JU X
	CVLAC:	11.905.328			
	E_MAIL	<a href="mailto:alexiscovab@gmail.com">alexiscovab@gmail.com</a>			
	E_MAIL				
Moreno Luis	ROL	CA	AS	TU	JU X
	CVLAC:	8.987.972			
	E_MAIL	<a href="mailto:luismorenog@cantv.net">luismorenog@cantv.net</a>			
	E_MAIL				
	ROL	CA	AS	TU	JU
	CVLAC:				
	E_MAIL				
	E_MAIL				

**FECHA DE DISCUSIÓN Y APROBACIÓN:**

2010	04	21
AÑO	MES	DÍA

**LENGUAJE. SPA**

**METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:**

**ARCHIVO (S):**

NOMBRE DE ARCHIVO	TIPO MIME
-------------------	-----------

TESIS. Uso de partículas hidrofobadas.doc	Application/msword

**CARACTERES EN LOS NOMBRES DE LOS ARCHIVOS:** A B C D E F G H I J K  
L M N O P Q R S T U V W X Y Z. a b c d e f g h i j k l m n o p q r s t u v w x y  
z. 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9.

#### ALCANCE

**ESPACIAL:** \_\_\_\_\_ (OPCIONAL)

**TEMPORAL:** \_\_\_\_\_ (OPCIONAL)

#### TÍTULO O GRADO ASOCIADO CON EL TRABAJO:

Ingeniero Químico \_\_\_\_\_

#### NIVEL ASOCIADO CON EL TRABAJO:

Pregrado \_\_\_\_\_

#### ÁREA DE ESTUDIO:

Departamento de Ingeniería Química \_\_\_\_\_

#### INSTITUCIÓN:

Universidad de Oriente – Núcleo Anzoátegui \_\_\_\_\_

#### METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

#### DERECHOS

De acuerdo al artículo 41 del Reglamento de Trabajos de Grado de la Universidad de Oriente: "Los trabajos de Grado son de la exclusiva propiedad de la Universidad de Oriente y sólo podrán ser utilizados a otros fines con el consentimiento del Consejo de Núcleo respectivo, quien le participará al Consejo Universitario".

José Angel Danglad Flores

**AUTOR**

**AUTOR**

**AUTOR**

Shirley Marfisi

**TUTOR**

Alexis Cova

**JURADO**

Luis Moreno

**JURADO**

Yraima Salas

**POR LA SUBCOMISION DE TESIS**