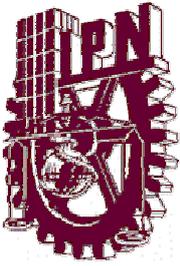


INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERIA QUIMICA E INDUSTRIAS EXTRACTIVAS



"ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA MOVILIZACIÓN DE ANTRACENO
EN ORTODICLOROBENCENO EN UN MEDIO POROSO MEDIANTE
UN SURFACTANTE GEMELO EN SOLUCIÓN ACUOSA"

TESIS PROFESIONAL

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS CON ESPECIALIDAD

EN INGENIERÍA QUÍMICA

PRESENTA:

Ing. Víctor Manuel Miranda Tovar

DIRECTOR:

Dr. Roberto Limas Ballesteros



México, D. F.

Junio 2006



INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL SECRETARIA DE INVESTIGACION Y POSGRADO

ACTA DE REVISION DE TESIS

En la Ciudad de México, D. F. siendo las 11:30 horas del día 15 del mes de Noviembre 2005 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis designada

Por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de la ESIQIE

para examinar la tesis de grado titulada:

"ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA MOVILIZACION DE ANTRACENO EN ORTODICLOROBENCENO EN UN MEDIO POROSO MEDIANTE UN SURFACTANTE GEMELO EN SOLUCION ACUOSA"

Presentada por el alumno:

MIRANDA
Apellido paterno

TOVAR
materno

VICTOR MANUEL
nombre(s)

Con registro: A

0	1	0	0	8	8
---	---	---	---	---	---

Aspirante al grado de:

MAESTRIA EN CIENCIAS CON ESPECIALIDAD EN INGENIERIA QUÍMICA

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **SU APROBACION DE LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISION REVISORA

Director de Tesis

DR. ROBERTO LIMAS BALLESTEROS

DR. SIMON LOPEZ RAMIREZ

DR. JUAN RAMON AVENDAÑO GOMEZ

DRA. TATIANA TIMOSHINA LUKIANOVA

DR. MA. ELENA DE LAUZ NAVARRO CLEMENTE

EL PRESIDENTE DEL COLEGIO

DR. ROBERTO LIMAS BALLESTEROS
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERIA QUIMICA E INDUSTRIAS EXTRACTIVAS
POSGRADO E INVESTIGACION



INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL

SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO.

CARTA DE CESIÓN DE DERECHOS

En la ciudad de **México, D.F.** el día **16** del mes **junio** del año **2006**, el (la) que suscribe **Víctor Manuel Miranda Tovar** alumno (a) del programa de **Maestría en Ciencias con Especialidad en Ingeniería Química** con numero de registro **A010088** adscrito a la **Escuela Superior de Ingeniería Química** manifiesta que es autor (a) intelectual del presente trabajo de tesis bajo la de dirección **Dr. Roberto Limas Ballesteros** y ceden los derechos del trabajo intitulado **Estudio Experimental de la Movilización de Antraceno en Ortodichlorobenceno en un Medio Poroso Mediante un Surfactante Gemelo en Solución Acuosa**, al **Instituto Politécnico Nacional** para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y del director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección miranda_victor2000@yahoo.com.mx. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

Víctor Manuel Miranda Tovar

Agradecimientos

A la Memoria de mi Madre, por su amor e inmenso cariño y quien siempre confió en mí.

A mi hermano Alejandro por su comprensión y apoyo.

A mi querida Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas por haberme hecho el profesionista que soy, sintiéndome orgullosamente politécnico.

Al Dr. Roberto Limas Ballesteros por confiar en mí y tener la paciencia para poder llevar este trabajo a su fin.

A la Dra. Ma Elena de la Luz Navarro Clemente por su amistad y valiosos consejos.

A los Doctores Tatiana Timoshina Lukianova, Juan Ramón Avendaño Gómez, por sus consejos y su valioso tiempo.

A mis amigos del Laboratorio de Ingeniería Química Ambiental, en especial a Frank Posadas Razo, Alejandro Quijano Sánchez, Ricardo Morales Robledo, por su gran ayuda en el desarrollo de este trabajo.

A mi compañero de trabajo Ing. Gabriel Aguilar Pérez, quien siempre me aconsejó y apoyó.

Definitivamente este trabajo es el resultado de la ayuda de mucha gente, !!! muchas gracias a todos!!!

RESUMEN

Se realizó un estudio experimental con el propósito de investigar y evaluar el impacto potencial que tienen las fuerzas viscosas y de flotación, en la movilización de hidrocarburos atrapados en medios porosos. En este estudio se utilizaron antraceno en ortodichlorobenceno en una concentración de 5gr/L, como medios porosos se usaron: Arena 0.833 mm. – 0.617 mm. (20-30 MESH) y Esferas de Vidrio de 3 mm. de diámetro, contenidos en un tubo de acero inoxidable horizontal, el tubo empacado simula un suelo con un medio poroso no consolidado y un surfactante gemelo comercial no iónico, denominado Surfynol 465. Cabe aclarar que pocos estudios han considerado estas fuerzas para la movilización de los NAPL.

Se manejaron cinco diferentes flujos para cada medio poroso, efectuando 20 corridas experimentales. En el tubo empacado, se realizó saturación con agua, posteriormente se inyectó el antraceno en ortodichlorobenceno hasta el 70 % del volumen de poro, después se impregnó hasta saturación residual de dicho contaminante, la movilización se efectuó con el surfactante gemelo no iónico Surfynol 465 a una concentración de 70 gr/L, la cual se determinó haciendo uso de los diagramas de Winsor, variando las concentraciones hasta lograr una emulsión de Winsor I a Winsor III.

Después de haber logrado la movilización, las muestras se analizaron por cromatografía de líquidos. Para evaluar el efecto de las fuerzas viscosas y de flotación, con las fuerzas capilares que actúan reteniendo el líquido orgánico dentro del medio poroso, se utilizó una relación matemática para obtener el Número Total de Atrapamiento N_t , en función de los números adimensionales de Capilaridad N_{Ca} y de Bond N_B . Con los resultados se elaboraron las Curvas de Saturación del Contaminante de acuerdo al medio poroso, expresadas en términos de Número Total de Atrapamiento N_t . (Total Trapping Number), adimensional.

Esta investigación dio como resultado que a flujos altos el número de Bond N_B es pequeño, por lo que se puede despreciar, quedando el Número Total de Atrapamiento en función del número de Capilaridad N_{Ca} , ya que en el estudio del Dr. Pennell, quien utilizó flujos pequeños demuestra que el N_B y el N_{Ca} , tienen ingerencia en el N_t . Con respecto al surfactante gemelo Surfynol 465, mostró ser una buena alternativa para movilizar los contaminantes, ya que redujo la Tensión Interfacial de 23.6 a 1.7 dinas/cm, obteniéndose una eficiencia de recuperación de 98.7 % para la Arena y de 95 % para las Esferas de Vidrio.

ABSTRACT

An experimental study was made in order to investigate and to evaluate the potential impact that the viscous and buoyancy forces, have on the mobilization hydrocarbon trapped in porous media. In this study anthracene-ortodichlorobenzene were used in a concentration of 5gr/L, as porous media: Sand 0,833 mm. - 0,617 mm (20-30 MESH) and Glass Spheres of 3 mm of diameter, contents in horizontal stainless steel pipe, pipe packed simulates a subsurface with unconsolidated porous media and one Gemini non-ionic commercial surfactant denominated Surfynol 465 was used. Is important to clarify that few studies have considered these forces on NAPL mobilization.

Five different flow rates were employed for each porous media, performing 20 experimental running. In the pipe packed, water saturation was made, subsequently was injected anthracene-orthodichlorobenzene to 70 % of the pore volume, later was impregnated until residual saturation of this polluting agent, mobilization took place with the Gemini non-ionic commercial surfactant Surfynol 465 to a concentration of 70 gr/L, which was determined making use of the Winsor diagrams, varying the concentrations up to achieving an emulsion of Winsor I to Winsor III.

After having achieved the mobilization, the samples were analyzed by liquid chromatography. In order to evaluate the effect of viscous and buoyancy forces to overcome the capillary forces acting to retain organic liquids within a porous medium, a mathematical relation was used to obtain the Total Trapping Number N_t , in terms of the Capillary and Bond dimensionless number, N_{Ca} and N_B , respectively. With these results obtained the polluting agent desaturation curves in according to porous medium, expressed in terms of dimensionless N_t .

This investigation indicate to high flows Bond number N_B is small, reason why it is possible to be despised, remaining the Total Trapping Number in function of the Capillary number N_{Ca} , since in the Dr Pennell study, who used small flows demonstrates that the N_B and N_{Ca} , have meddling in the N_t . With relation to Gemini non-ionic commercial surfactant Surfynol 465, showed to be a good alternative to mobilize the polluting agents, reducing Interfacial Tension from 23. 6 to 1. 7 dyn/cm, obtaining an recovery efficiency of 98.7 % for Sand and 95 % for Glass Spheres.

CONTENIDO

Resumen	ii
Abstract	iii
Lista de Figuras	vii
Lista de Tablas	x
Simbología	xiii
Introducción	1
Capítulo 1. Generalidades	4
1.1. Caracterización de medios porosos y fases líquidas contaminadas en el subsuelo	5
1.1.1. Migración de los NAPL	7
1.2. Caracterización, Estructura y Propiedades de los Surfactantes y Comportamiento de Fases	8
1.2.1. Formación de Micelas	11
1.3. Descripción del Comportamiento de Fases	13
1.4. Desarrollo Teórico del Número Total de Atrapamiento. Nt (Total Trapping Number)	14
1.5. Cálculo de las K_H, K, K_{eff} y K_{rw}	18
1.6. Obtención de la Porosidad de la Arena y de las Esferas de Vidrio	20
Capítulo 2. Antecedentes	24
2.1. Tecnologías de Procesos de Remediación de Suelos contaminados por Hidrocarburos	25
2.1.2. El Lavado de Suelos con Surfactantes	25
2.1.3. Técnicas Utilizadas en el Lavado de Suelos	27
2.1.4. Estudios realizados in-situ y en laboratorio	28

Capítulo 3. Experimentación	41
3.1.1. Planeación de la Experimentación	42
3.1.2. Descripción del Equipo Experimental	42
3.1.3. Método Experimental	44
3.1.4. Descripción General de los Materiales Usados	47
3.1.4.1. Características de los Materiales	47
3.1.5. Determinación de la CMC.	48
3.1.6. Determinación de la Concentración del Surfactante Gemelo Surfynol 465 a través del Método de Winsor	48
3.1.7. Diagrama de Flujo del Proceso Experimental	53
Capítulo 4. Resultados	55
4.1. Resultados Experimentales y Teóricos para esferas de vidrio	56
4.1.1. Valores del Gradiente de Presión (ΔP)	56
4.1.2. Valores de K_H y K	57
4.1.3. Valores de K_{eff} y K_{rw}	57
4.1.4. Valores de N_{Ca}, N_B y N_t	58
4.1.5. Valores del % de Saturación en Términos del Número Total de Atrapamiento (Total Trapping Number)	59
4.2. Resultados Experimentales y Teóricos para arena	61
4.2.1. Valores del Gradiente de Presión (ΔP)	61
4.2.2. Valores de K_H y K	62
4.2.3. Valores de K_{eff} y K_{rw}	62
4.2.4. Valores de N_{Ca}, N_B y N_t	63
4.2.5. Valores del % de Saturación en Términos del Número Total de Atrapamiento (Total Trapping Number)	64

Capítulo 5. Discusión de Resultados	65
5.1. Diferencias entre los medios porosos utilizados en la experimentación	66
5.2. Comparación de los resultados de la experimentación con los obtenidos por el Dr. Kurt Pennell et al.⁴⁵	77
Conclusiones y Recomendaciones	81
Conclusiones	82
Recomendaciones	84
Referencias Bibliográficas	85
ANEXO 1.1.	92
ANEXO 1.2.	95
ANEXO 1.3.	99
ANEXO 1.4.	103

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE FIGURAS

Número de Figura	Título	Pág.
1.1	Molécula Representativa del Surfactante Aniónico Lauril Sulfato de Sodio	9
1.2	Comparación entre un Surfactante Clásico y uno Gemelo	10
1.3	Representación Esquemática de la Determinación de la CMC (Concentración Micelar Crítica)	12
1.4	Variación de las Propiedades Físicas de los Surfactantes	12
1.5	Diagrama Esquemático del Modelo de Poro Atrapado y su correspondiente Sistema de Coordenadas	15
3.1	Esquema del Equipo usado en la Experimentación	43
3.2	Fotografía del Equipo usado en la Experimentación	43
3.3a	Fotografía Vial No. 12 (30.0 gr/L) Winsor Tipo III	49
3.3b	Fotografía Vial No. 13 (50.0 gr/L) Winsor Tipo III	50
3.3c	Fotografía Vial No. 14 (70.0 gr/L) Winsor Tipo III	50
3.3d	Fotografía Vial No. 15 (100.0 gr/L) Winsor Tipo II	50
3.4	Concentración del Surfactante Gemelo Surfynol 465	52
5.1	Variación del gradiente de presión (ΔP) en el medio poroso de esferas de vidrio, con respecto al flujo de agua para las pruebas de saturación.	67
5.2	Variación del gradiente de presión (ΔP) en el medio poroso de arena, con respecto al flujo de agua para las pruebas de saturación.	67
5.3	Variación de la Permeabilidad Hidráulica K_H en el medio poroso de esferas de vidrio con respecto al flujo de agua para las pruebas de saturación.	68
5.4	Variación de la Permeabilidad Hidráulica K_H en el medio poroso de arena, con respecto al flujo de agua para las pruebas de saturación.	68
5.5	Variación de la Permeabilidad Intrínseca K en el medio poroso de esferas de vidrio, con respecto al flujo de agua para las pruebas de saturación.	69
5.6	Variación de la Permeabilidad Intrínseca K en el medio poroso de arena, con respecto al flujo de agua para las pruebas de saturación.	69
5.7	Variación de la Permeabilidad Efectiva K_{eff} en el medio poroso de esferas de vidrio, con respecto al flujo de agua para las pruebas de saturación.	70
5.8	Variación de la Permeabilidad Efectiva K_{eff} en el medio poroso de arena, con	

respecto al flujo de agua para las pruebas de saturación.	70
5.9 Variación de la Permeabilidad Relativa K_{rw} en el medio poroso de esferas de vidrio, con respecto al flujo de agua para las pruebas de saturación.	71
5.10 Variación de la Permeabilidad Relativa K_{rw} en el medio poroso de arena, con respecto al flujo de agua para las pruebas de saturación.	71
5.11 Variación del número de capilaridad en el medio poroso de esferas de vidrio, con respecto al flujo de solución de surfactante.	72
5.12 Variación del número de capilaridad en el medio poroso de arena, con respecto al Flujo de solución de surfactante.	72
5.13 Variación del número de bond en el medio poroso de esferas de vidrio, con respecto al flujo de solución de surfactante.	73
5.14 Variación del número de bond en el medio poroso de arena, con respecto al flujo de solución de surfactante.	73
5.15 Volumen acumulado de contaminante desplazado en las esferas de vidrio después del lavado con el surfactante gemelo Surfynol 465	74
5.16 Volumen acumulado de contaminante desplazado en la arena después del lavado con surfactante gemelo Surfynol 465	74
5.17 % de Saturación Experimental y Teórico, expresado en Términos del Número Total Atrapamiento N_t (Total Trapping Number). Para esferas de vidrio	75
5.18 % de Saturación Experimental y Teórico, expresado en Términos del Número Total Atrapamiento N_t (Total Trapping Number). Para arena	76

LISTA DE TABLAS

LISTA DE TABLAS

Número de Tabla	Título	Pág.
1.1	Porosidad de la Arena	23
1.2	Porosidad de las Esferas de Vidrio	23
2.1	Experiencias con lavado de suelos contaminados	29
3.1	Volúmenes de Muestra de Contaminante Obtenido	46
3.2	Concentraciones Utilizadas en los Viales para determinar las Fases de Winsor	49
3.3	Concentración del Surfactante Surfynol 465 a utilizarse en la Experimentación.	51
4.1	Valores Experimentales para esferas de vidrio. Gradiente de Presión (ΔP)	56
4.2	Valores Teóricos para esferas de vidrio. Gradiente de Presión (ΔP)	56
4.3	Valores Experimentales para esferas de vidrio. K_H y K	57
4.4	Valores Teóricos para esferas de vidrio. K_H y K	57
4.5	Valores Experimentales para esferas de vidrio. K_{eff} y K_{rw}	57
4.6	Valores Teóricos para esferas de vidrio. K_{eff} y K_{rw}	58
4.7	Valores Experimentales para esferas de vidrio. N_{Ca} , N_B y N_t	58
4.8	Valores Teóricos para esferas de vidrio. N_{Ca} , N_B y N_t	59
4.9	Valores Experimentales para esferas de vidrio del % de Saturación en Términos del Número Total de Atrapamiento (Total Trapping Number).	59
4.10	Valores Teóricos para esferas de vidrio del % de Saturación en Términos del Número Total de Atrapamiento (Total Trapping Number).	60
4.11	Valores Experimentales para arena. Gradiente de Presión (ΔP)	61
4.12	Valores Teóricos para arena. Gradiente de Presión (ΔP)	61
4.13	Valores Experimentales para arena. K_H y K	62
4.14	Valores Teóricos para arena. K_H y K	62
4.15	Valores Experimentales para arena. K_{eff} y K_{rw}	62
4.16	Valores Teóricos para arena. K_{eff} y K_{rw}	63
4.17	Valores Experimentales para arena. N_{Ca} , N_B y N_t	63
4.18	Valores Teóricos para arena. N_{Ca} , N_B y N_t	64

4.19	Valores Experimentales para arena del % de Saturación en Términos del Número Total de Atrapamiento (Total Trapping Number).	64
4.20	Valores Teóricos para arena del % de Saturación en Términos del Número Total de Atrapamiento (Total Trapping Number).	64
5.1	% de error	66
5.2	Diferencias de operación entre el Dr. Kurt D. Pennell y el presente trabajo	77
5.3	Diferencias entre las velocidades de darcy utilizadas por el Dr. Kurt D. Pennell y la utilizadas en el presente trabajo	78
5.4	Diferencias entre los valores obtenidos de la permeabilidad intrínseca por el Dr. Ku D. Pennell y los del presente trabajo	78
5.5	Diferencias entre los valores obtenidos de la permeabilidad relativa por el Dr. Kurt Pennell y los del presente trabajo	78
5.6	Diferencias entre los valores obtenidos del número de capilaridad N_{Ca} por el Dr. Kurt D. Pennell y los del presente trabajo	79
5.7	Diferencias entre los valores obtenidos del número de bond N_B por el Dr. Kurt D. Pennell y los del presente trabajo	79
5.8	Diferencias entre los valores obtenidos del número de atrapamiento N_t (Total Trapping Number) por el Dr. Kurt D. Pennell y los del presente trabajo	80

SIMBOLOGÍA

A	Área sección transversal
BPC	Bifenilos policlorados
C	Símbolo del elemento Carbono
C	Concentración
cm.	Centímetro
cm ³ (c.c.)	Centímetro cúbico
CMC	Concentración Micelar Crítica
°C	Grados centígrados
cP	Centipoise
DNAPL	Fase líquida densa no acuosa (por sus siglas en inglés)
D _p , d _b	Diámetro de la partícula, diámetro del glóbulo
EPA	Asociación de Protección Ambiental (por sus siglas en inglés)
F	Fuerza neta para desplazar el glóbulo
ft	Pie (por sus siglas en inglés)
g	Constante de la aceleración de la gravedad
g _c	Factor de conversión de la ley de Newton
GPM	Galones por minuto
gr	Gramos
H	Símbolo del elemento Hidrógeno
HLB	Balace hidrófilo Lipófilo (por sus siglas en inglés)
H ₂ O	Agua
HPA	Hidrocarburos poli aromáticos
HPLC	Cromatógrafo de líquidos de alta resolución (por sus siglas en Inglés)

K	Permeabilidad intrínseca del medio poroso
\hat{k}	Vector unitario dirección z
K _{gf}	Kilogramos fuerza
K _H	Permeabilidad hidráulica
K _m	Coefficiente de partición
K _{rw}	Permeabilidad relativa de la solución acuosa
K _{eff}	Permeabilidad efectiva
L	Litro
L	Longitud del tubo metálico
l	Dirección l
\hat{l}	Vector unitario dirección l
lb	libra
m	Peso del material poroso (arena ó esferas de vidrio)
MESH	Mallas
MSR	Relación Molar de Solubilización (por sus siglas en inglés)
mg	Miligramos
min	Minutos
mm	Milímetros
N _a	Símbolo del elemento Sodio
NAPL	Fase líquida no acuosa (por sus siglas en inglés)
nm	Nanómetros
O	Símbolo del elemento Oxígeno
ODCB	Ortodiclorobenceno
P	Presión
P _A	Fuerza de Presión sobre el lado de adelanto del glóbulo

PCE	Tetracloroetileno (por sus siglas en inglés)
pH	Potencial hidrógeno
POE	Polioxietileno
P_R	Fuerza de Presión sobre el lado de retroceso del glóbulo
PSI	Presión en pulgadas cuadradas (por sus siglas en inglés)
Q	Gasto volumétrico
q_w	Velocidad intersticial
r	Radio del Tubo Metálico
r_b	Radio del área del glóbulo perpendicular al vector \hat{l}
Re'	Reynolds modificado
R_H	Radio hidráulico
r_n	Radio del cuello del poro
r_p	Radio del cuerpo del poro
seg	Segundos
TCE	Tricloroetileno
UV	Ultra violeta
V	Volumen de la probeta
V_o	Volumen líquido orgánico
\bar{V}_o	Velocidad superficial
V_P	Volumen de poro
V_r	Volumen real partículas material poroso
W_{pic}	Peso del picnómetro
$W_{pic + agua}$	Peso del picnómetro + peso del agua
$W_{pic + arena}$	Peso del picnómetro + peso de la arena

$W_{\text{pic} + \text{agua} + \text{arena}}$	Peso del picnómetro + peso del agua + peso de la arena
$W_{\text{pic} + \text{agua} + \text{esferas de vidrio}}$	Peso del picnómetro + peso del agua + peso de las esferas de vidrio
$W_{\text{pic} + \text{esferas de vidrio}}$	Peso del picnómetro + peso de las esferas de vidrio
W_r	Peso real partículas material poroso
$W_{r \text{ arena}}$	Peso real partículas de arena
$W_{r \text{ esferas de vidrio}}$	Peso real de las esferas de vidrio
x	Abscisa al origen
z	Ordenada al origen
Números Adimensionales	
N_B	Número de Bond
N_{Ca}	Número de Capilaridad
N_t	Número Total de Atrapamiento
Letras Griegas	
α	Ángulo arbitrario considerado
β	Equivale a: $1 - r_n / r_p$
$\Delta\rho$	Gradiente de densidad
Δl	Longitud promedio del glóbulo
ΔP	Gradiente de presión
∇P	Gradiente de presión en notación vectorial
ε	Porosidad
θ	Ángulo de contacto
θ_A	Ángulo de contacto de adelanto
θ_R	Ángulo de contacto de retroceso

λ	Longitud de onda
μ_w	Viscosidad solución acuosa
π	3.14159 26535
ρ_a	Densidad del agua
ρ_A	Densidad aparente
ρ_o	Densidad del contaminante
ρ_r	Densidad real
ρ_w	Densidad de la solución acuosa
σ_{ow}	Tensión interfacial
τ	Tensión superficial
Φ_s	Esfericidad medio poroso
ω_{probeta}	Peso de la probeta
$\omega_{\text{probeta+arena ó esferas de vidrio}}$	Peso de la probeta + peso de la arena ó esferas de vidrio

INTRODUCCIÓN

Actualmente los casos de contaminación del suelo se han incrementado de manera importante en muchas partes del mundo, esto se debe en la mayoría de los casos, al manejo inadecuado de residuos y procesos industriales, en donde no se cuenta con un control estricto para su disposición y descargan sus productos contaminantes sobre el suelo y las aguas.

A pesar de todos los beneficios que el petróleo y sus derivados brindan a la sociedad moderna, existe un riesgo inherente en la extracción, el almacenamiento temporal, el transporte y el uso. Es debido al manejo de hidrocarburos del petróleo que muchas industrias tienen en la actualidad una responsabilidad muy grande con respecto a los impactos ambientales sobre el suelo.

Las actividades propias de la industria petrolera conllevan efectos ambientales indeseables a lo largo de la producción, el procesamiento, el almacenamiento y la distribución de hidrocarburos y productos petroquímicos. Estos efectos se manifiestan como emisiones al aire, descargas al agua, generación de residuos peligrosos y derrames de hidrocarburos que se conocen como NAPL (non-aqueous phase liquid) Fase líquida no acuosa

Los principales problemas de contaminación de suelos y acuíferos en México, son los ocasionados por derrames de hidrocarburos como se dijo anteriormente: petróleo crudo, combustóleo, gasóleo, gasolina, diesel, turbosina, lodos aceitosos y aceites lubricantes gastados, entre otros. Cada uno de estos productos tiene su propia complejidad química, y la situación se torna aún más compleja cuando los contaminantes se presentan en forma de mezcla ó se encuentran intemperizados.

En general, algunos hidrocarburos tienen menor densidad que el agua, por lo que tienden a flotar cuando están en contacto con ésta y se conocen como LNAPL (Light non-aqueous phase liquid) Fase líquida ligera no acuosa, así mismo existen hidrocarburos que tienen mayor densidad que el agua, por lo que tienden a precipitar cuando están en contacto con ésta y se conocen como DNAPL (Dense non-aqueous phase liquid) Fase líquida densa no acuosa.

Entre los Métodos de Remediación de suelos, para efectuar la limpieza de los hidrocarburos liberados al Medio Ambiente, uno de los más recomendables es el uso de surfactantes para movilizar y solubilizar el contaminante de la superficie y del subsuelo.

Los factores a tomarse en cuenta para su aplicación, son la eficiencia en la recuperación y el rehúso del surfactante utilizado.

El lavado de suelos con surfactantes es un fenómeno complejo que ha sido estudiado con mayor profundidad en las últimas décadas y abarca estudios de permeabilidad, solubilidad, migración, movilización, etc. De estos estudios se ha encontrado que para cierto tipo de suelos no consolidados, el mecanismo que funciona mejor para el lavado de hidrocarburos con surfactantes es el de movilización.

La movilización de hidrocarburos se ve afectada por diversos factores como: tensión interfacial, viscosidad, densidad, permeabilidad, etc. En años recientes algunos autores consideran importante estudiar la influencia de las fuerzas de flotación y gravitacionales que actúan sobre los glóbulos del NAPL,⁴⁵ ya que si ésta influencia hace que la suspensión surfactante-contaminante descienda, el proceso de lavado de suelos se ve seriamente comprometido ya que existe el riesgo de que esta suspensión se vaya a mayor profundidad. Por esta razón en este trabajo se propone realizar un estudio de la influencia de las fuerzas de flotación y gravitacionales, en condiciones de flujo alto.

En el Capítulo Uno se presentan algunas generalidades de suelos consolidados y no consolidados, de los hidrocarburos conocidos como NAPL, DNAP y LNAPL, migración no controlada, solubilización, movilización, estructura y propiedades de los surfactantes, así como la diversidad existente en el mercado de ellos, formación de micelas, descripción del comportamiento de fases Winsor, tecnologías de procesos de remediación de suelos contaminados por hidrocarburos y una breve descripción del lavado de suelos con surfactantes.

En el Capítulo Dos se presentan algunos de los principales estudios que se han llevado a cabo tanto en laboratorio, como in-situ del lavado de suelos con surfactantes así como un resumen de dichos trabajos.

En el Capítulo Tres mencionamos la metodología experimental que se llevó a cabo en este trabajo, así como el equipo utilizado para el mismo.

En el Capítulo Cuatro indicamos todos los resultados obtenidos tanto experimentales como teóricos y una discusión de los mismos, comparándolos con los encontrados por el Dr. Kurt Pennell,⁴⁵ ya que se utilizaron los mismos parámetros que utilizó en su estudio, pero diferentes condiciones tanto en flujos, como en contaminantes y surfactante, en nuestro caso se empleó un surfactante gemelo y un tubo metálico horizontal empacado, en lugar de surfactantes clásicos y columnas empacadas usadas en el estudio de él.

CAPÍTULO 1.

GENERALIDADES

1.1. Caracterización de medios porosos y fases líquidas contaminadas en el subsuelo.

6, 11, 19, 20, 25, 27, 34, 36, 39, 41, 45, 49, 50, 74, 78 El medio ambiente del subsuelo generalmente se subdivide en Medio Poroso no Consolidado y Consolidado:

Medio Poroso no Consolidado. Se compone de depósitos tales como arena, grava, sedimentos, barro y arcilla, la grava y arena pueden ser ampliamente permeables y ofrecer poca resistencia al flujo de agua y contaminantes, mientras que aquellos que contienen una gran proporción de sedimentos, barro y arcilla pueden ser relativamente impermeables.

La porosidad de la mayoría de materiales no consolidados es típicamente entre 15 y 45 por ciento. Existe una variedad de materiales existentes, que dan realce a la heterogeneidad en el subsuelo. El grado de heterogeneidad puede ser el factor de control que determine que una mezcla química puede contactar regiones contaminadas del subsuelo.

Un típico depósito no consolidado puede mostrar un intervalo de 3 a 4 órdenes de magnitud en permeabilidad en escalas del orden de centímetros.

El éxito ó fracaso del potencial de la aplicación de una tecnología de remediación, depende del grado y tipo de heterogeneidad presente en el subsuelo.

Medio Poroso Consolidado. Se llama así, al conjunto de materiales tales como los lechos de roca fracturada y que pueden ser subdivididos generalmente en depósitos de carbonato, tales como caliza y ciertas piedras areniscas, las cuales pueden tener una significativa matriz de porosidad, los depósitos cristalinos tales como granitos, los cuales generalmente tienen una baja matriz de porosidad, y los depósitos volcánicos tales como el flujo de lava y camas cilíndricas, las cuales tienen variantemente alta y baja matriz de porosidad. Independientemente del grado de matriz de porosidad, la migración primaria del contaminante que camina en la roca fracturada, típicamente es la red de fractura.

Debido a que el volumen de espacio vacío abierto en la fractura de la red es pequeño, siempre hay volúmenes pequeños de contaminante que pueden migrar substancialmente en la roca fracturada. Es importante notar que típicamente, solamente una fracción pequeña de la fractura abierta representa la mayor ruta de flujo en la roca. Esto presenta un desafío en el intento de contactar todas las regiones contaminadas de la masa de roca con una inyección de agentes de remediación tales como los surfactantes y cosolventes.

NAPL. Fase líquida no acuosa. Los contaminantes en el subsuelo pueden ser agrupados dentro de varias clases incluyendo compuestos orgánicos sintéticos, compuestos orgánicos, metales, cationes, aniones, microorganismos y radionúclidos (Isótopos Radiactivos),

la mayoría de los compuestos orgánicos sintéticos, se encuentran en sitios contaminados, son en pequeña cantidad solubles en agua, resultando que ellos pueden existir en el subsuelo como una fase líquida separada, a menudo esto se refiere a los NAPL, dentro de éstos se encuentran los:

DNAPL. Fase líquida densa no acuosa. Son los líquidos orgánicos más pesados que el agua.

Ejemplo de tales líquidos incluye a solventes clorados, aceites bifenilos policlorados (BPC), creosota, y alquitrán de hulla.

Debido a que son más densos que el agua, los DNAPL tienen el potencial de migrar a grandes profundidades bajo el manto de agua.

LNAPL. Fase líquida ligera no acuosa. Son los líquidos orgánicos menos densos que el agua.

Ejemplo de tales líquidos incluye a las gasolinas, turbosinas, y aceites de calentamiento.

Los LNAPL tienden a acomodarse arriba y ligeramente bajo el manto de agua.

NAPL Residual. Se refiere a la presencia de pequeñas burbujas desconectadas generalmente conocidas como glóbulos del líquido orgánico, que son atrapados en espacios porosos de medios porosos ó fracturados por fuerzas capilares.

Los NAPL residuales se forman a partir de un cuerpo migrado de NAPL que se cierra abruptamente en el medio poroso, los glóbulos de NAPL residual están típicamente entre 5% y 40 % del volumen de poro.⁵⁶

Esto es sencillamente entendible que la migración de los NAPL no puede tomar lugar a través del subsuelo sin la formación del NAPL residual. El grado de formación de NAPL residual en un medio particular está en función de muchos factores incluyendo, su densidad, viscosidad, tensión interfacial, permeabilidad del medio poroso y la presión capilar máxima alcanzada durante el proceso de migración original.

NAPL Reservado. Se refiere a la presencia de NAPL en altas saturaciones que en el residual, llegando a tener saturación entre el 30 al 80 por ciento del espacio poroso.

El NAPL reservado es distintamente diferente que el NAPL residual debido a que el reservado representa la distribución de un fluido continuo y es potencialmente movable en el subsuelo y tiende a formar barreras capilares, el DNAPL reservado se encuentra sobre finos granos de

yacimientos y el LNAPL reservado sobre un manto de alto contenido de agua en la zona insaturada.

El NAPL reservado puede ser movilizado en respuesta a bombear agua subterránea, lo cual puede significar un avance si las paredes de extracción son colocadas adecuadamente, pero una desventaja si la movilización ocurre dentro de regiones previamente no contaminadas del subsuelo, pueden también ser movilizados si se inyectan agentes tenso activos tales como los surfactantes y cosolventes debajo de la tensión interfacial NAPL-agua

1.1.1. Migración de los NAPL. Los NAPL migran hacia abajo a través de zonas no saturadas, distribuyéndose a si mismos tanto residual como reservado, porque son típicamente humectantes con respecto al aire y no humectantes con respecto al agua, ellos humectarán en seco, grano de estrato fino y fluirán lateralmente a lo largo de cualquier estrato conteniendo alta concentración de agua, no exhibiendo un camino continuo de aire. Los NAPL en las zonas no saturadas existirán con presión negativa y no fluirán dentro de un pozo de sondeo o de excavación.

La migración del NAPL a través de medios porosos no saturados es extremadamente sensitiva a alojarse en las estructuras como resultado de las fuerzas capilares.

Se ha encontrado que el DNAPL migra inconfundiblemente a través de ciertos yacimientos y laminaciones y no a través de otros. La migración del DNAPL es gobernada por la estructura geológica.

Los caminos de migración que siempre siguen los DNAPL, son las rupturas y los sitios hundidos de los yacimientos y laminaciones. En ocasiones los yacimientos y laminaciones a través de los cuales la migración del DNAPL ocurre, no fue más que unos pocos milímetros de espesor.

Y se ha encontrado que la variación en la conductividad hidráulica entre yacimientos adyacentes y laminaciones fue generalmente menor de un factor de dos. Ésta imponderable variación en la conductividad hidráulica en la escala milímetro a centímetro, aunque es suficiente para gobernar la migración del DNAPL, sería virtualmente imposible para caracterizar los sitios contaminantes usando hoy día métodos de investigación hidrogeológicos.

Movilización de los NAPL. La reducción en la tensión interfacial NAPL-agua surge de la adición de un surfactante a una solución acuosa la cual reduce la influencia de las fuerzas capilares.

Las fuerzas capilares son responsables de la retención de NAPL residual y de la formación de inundaciones de NAPL.

Si la tensión interfacial se reduce suficientemente la movilización física del NAPL puede ocurrir. Esto puede ser deseable para el caso de un LNAPL donde el producto libre puede ser recuperado en la vecindad del nivel hidrostático usando paredes desnatadoras, pero puede ser indeseable en el caso de un DNAPL donde una bajísima tensión interfacial puede resultar en la movilización vertical del DNAPL dentro del subsuelo

Solubilización de los NAPL. El mecanismo consiste en que el surfactante inunda la solución de NAPL incrementando la solubilización del mismo, eso se consigue una vez que suficiente cantidad de surfactante ha sido adicionada a la solución acuosa, formando micelas que son generalmente orientadas con su grupo de cola hidrófobo hacia el interior de la misma y dentro de ese interior hidrófobo las moléculas de los NAPL residen.

De ese modo se incrementan la solubilidad acuosa del contaminante.

1.2. Caracterización, Estructura y Propiedades de los Surfactantes y Comportamiento de Fases.

^{4, 9, 17, 28, 32, 35, 36, 37, 38, 43, 49, 50, 51, 65, 74, 75, 78} El nombre de surfactante corresponde a la abreviación de agente de superficie activa, también llamado agente tenso activo y es una molécula que consta de una porción hidrófoba (insoluble en agua) unida a una parte hidrófila (soluble en agua), la cual puede ser de naturaleza aniónica, catiónica o no iónica y switteriónica.

Debido a la naturaleza bipolar de dichas moléculas, los surfactantes tienden a congregarse entre dos fases inmiscibles separadas por una tensión superficial particular y por sus propiedades fisicoquímicas presentan un gran potencial para aplicarse en los procesos de lavado de suelos, ya que esto hace que sea eficiente su uso.

Los surfactantes, son compuestos químicos que tienen el potencial de alterar la tensión interfacial de los compuestos.

El uso de surfactantes para solubilizar ó movilizar los contaminantes orgánicos en el subsuelo es un área de aplicación relativamente nueva., su uso en los sistemas del subsuelo datan de 1963 cuando los sulfonatos de petróleo fueron patentados y se difundió ampliamente su uso, exaltando sus efectos para recuperar petróleo.

Los surfactantes incrementan drásticamente la solubilidad de los contaminantes orgánicos hidrófobos y/o pueden aumentar significativamente la movilidad de los contaminantes reduciendo la tensión interfacial entre los contaminantes y el agua subterránea.

Los surfactantes se clasifican generalmente de acuerdo con la naturaleza del grupo de su cabeza hidrófila mencionada anteriormente, la parte hidrófoba (cola) tiene una cadena de hidrocarburos que contienen varios átomos de carbono (**Figura No. 1.1**).

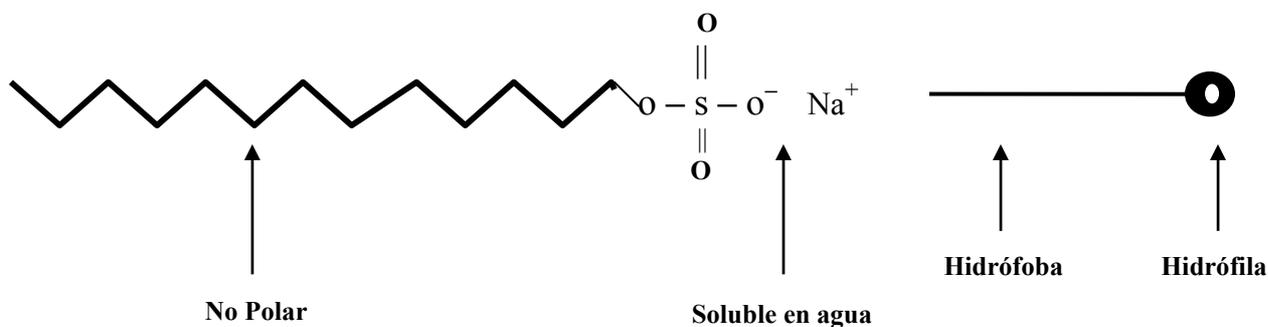


Figura No. 1.1 Molécula representativa del surfactante aniónico Lauril sulfato de sodio

Las fuentes de los compuestos hidrófobos son normalmente grasas y aceites naturales, fracciones del petróleo, polímeros sintéticos o alcoholes sintéticos de un peso molecular relativamente alto, mientras que la parte hidrófila (cabeza) son compuestos iónicos o polares.

Surfactantes Aniónicos. Tienen una molécula con superficie activa cargada negativamente (anión). Estos compuestos tienden a ser buenos disolventes de aceites y grasas y son relativamente no tóxicos, entre los más comunes se encuentran los siguientes:

Alquilbencenosulfonato, Alquilsulfato, Fosfato Alquilfenil polioxietileno, Sulfato Alquilfenil polioxietileno.

Surfactantes Catiónicos. Tienen una molécula con superficie activa cargada positivamente (catión). Estos compuestos tienen una baja capacidad disolvente, son tóxicos y su eliminación del agua del suelo es muy difícil debido a que sus interacciones electrostáticas favorecen su persistencia ya que, por lo general, los suelos o los materiales naturales están cargados negativamente, entre los más comunes se encuentran los siguientes:

Oxido Alquildimetilamina, Haluro de Alquilbencil Dimetilamonio, Haluro de Alquilpiridina.

Surfactantes No-Iónicos. Tienen una molécula sin carga eléctrica, los cuales sin embargo, son de naturaleza polar.

Estos compuestos se utilizan ampliamente con otro tipo de surfactantes, debido a su facilidad para mezclarse, entre los más comunes se encuentran los siguientes:

Alcohol Polietenoxilato, Alquilfenol Polietenoxilato, Alcanolamida, Oxido de Etileno-Oxido de Propileno Copolímeros,

Surfactantes Zwitteriónicos. Tienen una molécula con superficie activa cargada tanto negativa como positiva.

Estos compuestos tienen la ventaja de comportarse como ambas características de aniónicos y catiónicos, dependiendo del pH de la solución, entre los más comunes se encuentran los siguientes:

Alquil Betaino, Alquil Sulfobetaino, N-Dimetil Betaino.

Surfactantes Gemelos. Consisten de dos colas convencionales cuyas cabezas de grupo están unidas covalentemente por un espaciador (usualmente hidrófobo), de longitud variable (**Figura No. 1.2**).

En soluciones acuosas, los surfactantes gemelos espontáneamente se agregan dentro de micelas cuya forma y tamaño son altamente sensitivas a la longitud de su espaciador hidrófobo.

Los surfactantes gemelos movilizaran más cantidad de NAPL que los clásicos, entre los más comunes se encuentran los siguientes:

Diol Acetilénico Etoxilado, Diol Alcano.

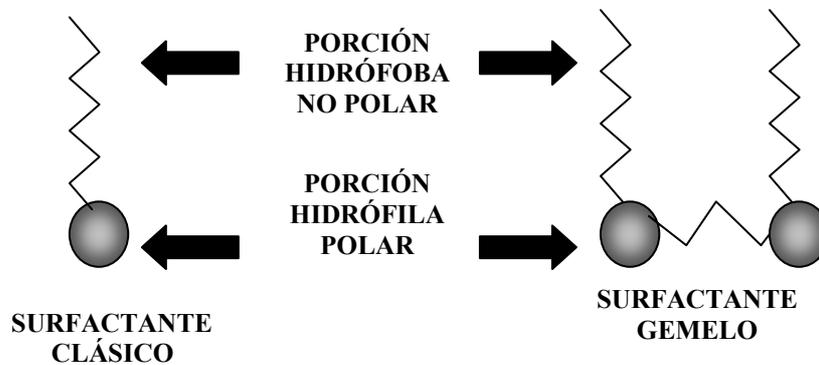


Figura No. 1.2 Comparación esquemática entre un surfactante clásico y uno gemelo

1.2.1. Formación de Micelas. Por su naturaleza, una molécula de surfactante puede disolverse en agua, adsorbida en la interfase líquido-gas ó formar parte de una micela.

Las micelas son ensambles esféricos compuestos por moléculas de surfactante, que contienen una porción exterior polar (parte hidrófila del surfactante) y una parte interior no polar (parte hidrófoba del surfactante).

La parte polar da a las micelas una alta solubilidad en el agua, mientras que la porción, no polar actúa como una fase en donde se da la distribución de los compuestos orgánicos.

Las micelas se forman cuando se tienen moléculas de una solución de surfactante diluida en agua, la mayoría son adsorbidas en la interfase aire/agua; pero si se agrega más surfactante, éste será adsorbido en la superficie hasta que se llega a la saturación, a partir de este momento la tensión superficial será constante aunque se siga incrementando la concentración de surfactante, las moléculas del mismo permanecen en la solución, pero serán repelidas por el agua, formando entonces ensambles esféricos conocidos como **micelas**

La concentración del surfactante en la que aparecen las primeras micelas se llama Concentración Micelar Crítica (CMC); este valor es característico para cada surfactante, y puede determinarse experimentalmente mediante diversos métodos, que permiten comparar la tensión superficial (dinas/cm) con la dosificación del surfactante (mol/L), obteniendo curvas como la mostrada en la **Figura No. 1.3**, donde el punto de inflexión corresponde a la CMC, por debajo de ésta, virtualmente todos los surfactantes disueltos están presentes en forma de monómeros, mientras que por encima de este valor, el surfactante existe en la forma micelar. La variación de muchas propiedades físicas como son la Tensión Superficial, la Conductividad y la Absorbancia Máxima, cambian considerablemente con la concentración de surfactantes en solución por arriba de la CMC (**Figura No. 1. 4**)

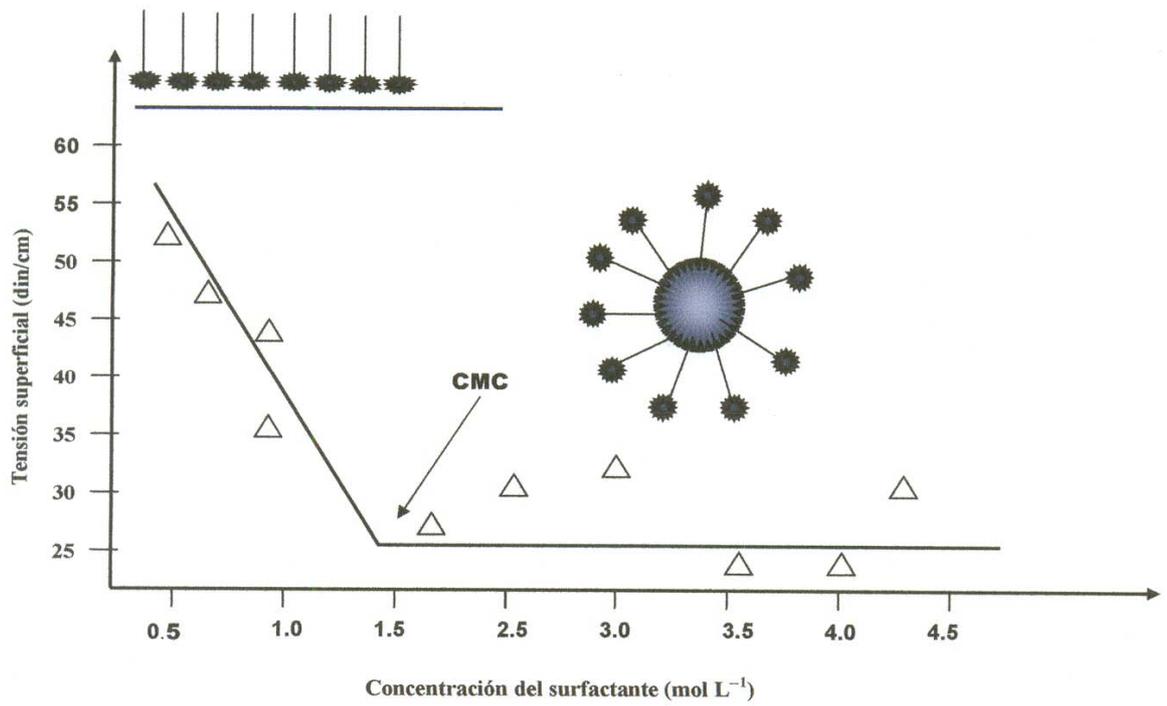


Figura No. 1.3 Representación esquemática de la determinación de la CMC

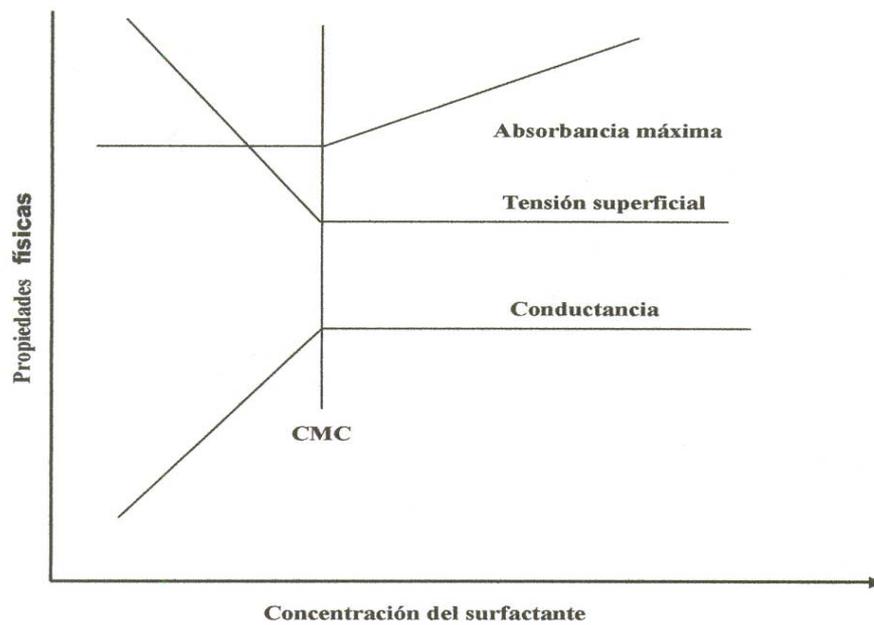


Figura No. 1.4 Variación de las propiedades físicas de los surfactantes

La Tensión Superficial es constante por arriba de la CMC, dicha tensión muestra que mientras más material se adiciona a la solución, la actividad superficial de los surfactantes permanece constante.

Esto se explica debido a que las moléculas de superficie activa están asociadas a unidades que llevan a cabo una baja actividad en solución.

La conductividad constante de una solución micelar iónica por arriba de la CMC muestra que la concentración de moléculas de superficie activa libres permanece constante al agregar el surfactante.

El incremento en la Absorbancia Máxima por encima de la CMC es también indicativo de la formación de grandes unidades (micelas en solución).

Las observaciones de estas propiedades físicas son usadas en la determinación de la CMC de los surfactantes.

1.3. Descripción del Comportamiento de Fases. Los surfactantes pueden movilizar y solubilizar compuestos orgánicos, como se mencionó anteriormente, dependiendo del grado de la reducción de la tensión interfacial involucrada. Lo anterior está relacionado con el comportamiento de fase de la solución. Cuando un surfactante es usado para movilizar ó solubilizar compuestos orgánicos, el comportamiento puede ser conducido mediante la alteración de la salinidad en la solución inyectada. Como la salinidad de la solución se incrementa, la interacción entre los grupos hidrófilos del surfactante y las moléculas del agua es reducida, cuyo resultado es aumentar la interacción entre los grupos hidrófobos del surfactante y la fase orgánica. Así la tendencia hidrófila de las moléculas del surfactante puede ser cambiada, mediante el cambio de la salinidad del medio acuoso. La salinidad se puede ajustar continuamente para optimizar el desempeño de ésta.

Winsor desarrolló un sistema formal para describir las complejas interacciones entre la fase orgánica, el agua y el Surfactante. Tres tipos de comportamiento de fase se forman cuando el compuesto orgánico y la solución de surfactante son mezclados y que se pueden describir como sigue:

Winsor Tipo I. La Solubilización del compuesto orgánico en una solución simple en fase acuosa con surfactante es la definición del comportamiento Winsor Tipo I.

Una micro emulsión de compuesto orgánico en agua se produce, es decir las micelas tienen en su interior al compuesto orgánico con su extremo hidrófilo en dirección al exterior de la micela.

Winsor Tipo II. Es la migración de las moléculas de surfactante a la fase del compuesto orgánico, lo cual significa que la Solubilización del hidrocarburo nunca ocurre.

Una micro emulsión de agua en compuesto orgánico se presenta en este caso, o lo que comúnmente se conoce como micro emulsión invertida, la cual consiste en la captura de las moléculas de agua en el interior de la micela con su extremo hidrófobo dirigido hacia el exterior de la misma.

Winsor Tipo III. Este comportamiento es observado cuando coexisten tres fases separadas, incluyendo la fase acuosa, la micro emulsión y la fase de los compuestos orgánicos. La fase media tiene una densidad entre la del agua y la de los compuestos orgánicos y consiste de una micro emulsión con surfactante.

La formación de la fase separada está asociada con la tensión interfacial ultra-baja y una alta solubilización.

1.4. Desarrollo Teórico del Número Total de Atrapamiento. ⁴⁵ N_T (Total Trapping Number)

Para un medio poroso humidificado con solución acuosa, las condiciones que gobiernan la movilización de un NAPL atrapado en dicho medio poroso, puede ser evaluado por las fuerzas que actúan sobre un “glóbulo” de NAPL, la (Figura No. 1.5) representa un sencillo poro en el cual un glóbulo de NAPL es atrapado. El poro es orientado en la dirección l , el cual hace un ángulo arbitrario α , con el eje horizontal. Dentro de este poro, las fuerzas de presión y gravedad actúan para movilizar el glóbulo pero son balanceadas por las fuerzas capilares que actúan para retener el glóbulo de NAPL.

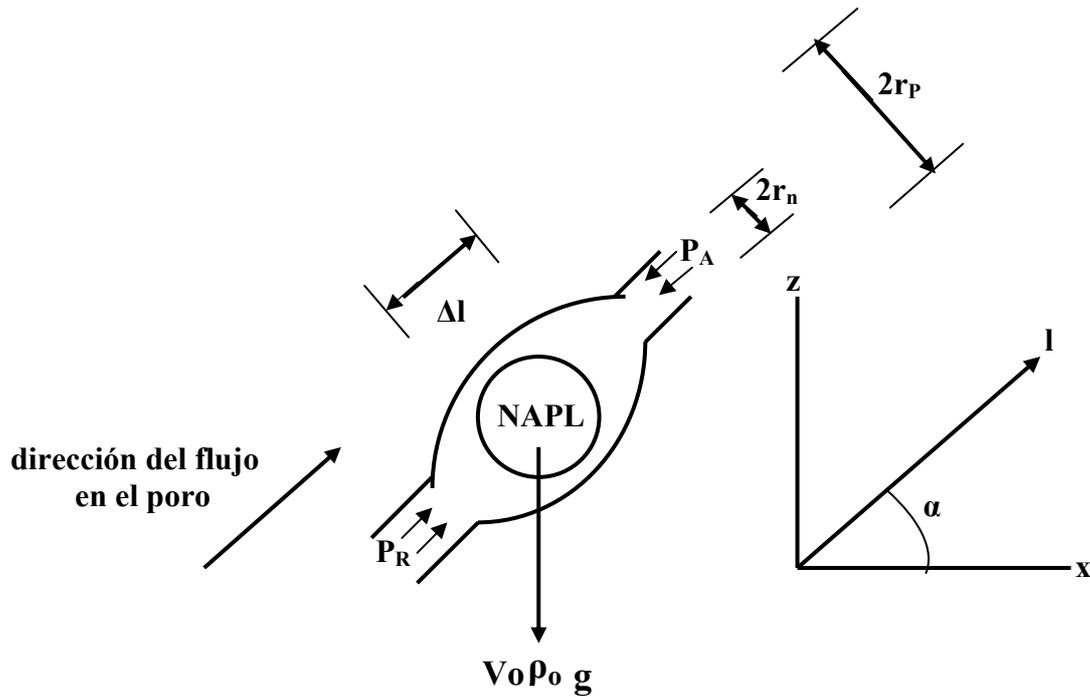


Figura No. 1.5 Diagrama Esquemático del Modelo de Poro Atrapado y su correspondiente Sistema de Coordenadas.⁴⁵

Un balance de fuerzas en la dirección del poro permite una valoración cuantitativa de las condiciones bajo las cuales la movilización del glóbulo puede ocurrir dentro del poro así como las condiciones bajo las cuales la movilización de las fuerzas de balance y de retención está determinando las condiciones críticas para la movilización. La sumatoria de las fuerzas de presión y gravitación actúan sobre el glóbulo a lo largo de la dirección l :

$$P_R (\pi r_b^2) - P_A (\pi r_b^2) - \rho_0 g (\pi r_b^2) \Delta l \text{ sen } \alpha \quad (1)$$

Aquí, πr_b^2 es el Área normal del glóbulo al vector \hat{l} .

Bajo las condiciones críticas para la movilización las fuerzas de presión y gravedad serán balanceadas por la capilaridad máxima neta y la fuerza de presión del glóbulo por lo tanto puede apoyarse dentro del poro. Esta fuerza de presión de capilaridad puede ser aproximada usando la ecuación de YOUNG-LAPLACE:

$$2\sigma_{ow} \left(\frac{\cos \theta_A}{r_n} - \frac{\cos \theta_R}{r_p} \right) \pi r_b^2 \quad (2)$$

La expresión asume que el glóbulo tiene una presión interna uniforme. Asumiendo que los ángulos de contacto del adelanto y retroceso finales del glóbulo del NAPL son similares, la ecuación 2 puede ser rescrita como:

$$\frac{2\beta\sigma_{ow}\cos\theta}{r_n}(\pi r_b^2) \quad (3)$$

La condición crítica para la movilización puede ser encontrada por la expresión de igualar la ecuación 1 y 3 y dividiéndolas por πr_b^2 tenemos:

$$P_R - P_A - \rho_0 g \Delta l \sin \alpha = \frac{2\beta\sigma_{ow}\cos\theta}{r_n} \quad (4)$$

En notación vectorial la ecuación 4 puede ser expresada como:

$$-\nabla P \cdot \hat{l} \Delta l - \rho_0 g \hat{k} \cdot \hat{l} \Delta l = \frac{2\beta\sigma_{ow}\cos\theta}{r_n} \quad (5)$$

Aquí \hat{l} y \hat{k} son los vectores unitarios en la dirección **l** y **z** respectivamente

El término izquierdo de la ecuación 5 puede ser reformulado directamente en términos de la viscosidad y las fuerzas de flotación. Una representación alternativa para el gradiente de presión puede ser obtenida de la Ley de Darcy ⁴⁵:

$$q_w = -\frac{KK_{rw}}{\mu_w}(\nabla P + \rho_w g \hat{k}) \quad (6)$$

En la ecuación 6 ha sido asumido por simplicidad que el medio es isotrópico

Usando la ecuación 6 para expresar ∇P y sustituyendo dentro del campo de la ecuación 5 tenemos:

$$\frac{\mu_w \Delta l}{KK_{rw}} q_w \cdot \hat{l} + \Delta \rho g \hat{k} \cdot \hat{l} \Delta l = \frac{2\beta\sigma_{ow}\cos\theta}{r_n} \quad (7)$$

$$\text{Aquí } \Delta \rho = \rho_w - \rho_0 \quad (8)$$

La ecuación 5 puede ser rearmada como:

$$\frac{q_w \mu_w}{\sigma_{ow} \cos \theta} + \frac{\Delta \rho g K K_{rw}}{\sigma_{ow} \cos \theta} \sin \alpha = \frac{2\beta K K_{rw}}{\Delta l r_n} \quad (9)$$

Ó

$$N_{Ca} + N_B \text{sen} \alpha = \frac{2\beta KK_{rw}}{\Delta l r_n} \quad (10)$$

Donde:

$$N_{Ca} = \frac{q_{w1} \mu_w}{\sigma_{ow} \cos \theta} \quad (11)$$

$$N_B = \frac{\Delta \rho g KK_{rw}}{\sigma_{ow} \cos \theta} \quad (12)$$

En la ecuación 11 el número capilar N_{Ca} es adimensional, definido en términos del componente del flujo acuoso en la dirección del poro, relacionando las fuerzas de viscosidad y capilaridad. En la ecuación 12 el número de Bond N_B es también adimensional y representa la relación de las fuerzas de flotación y capilaridad. La expresión del lado derecho es una función del espacio topográfico del poro y del tamaño del glóbulo.

La fuerza neta actuando para desplazar un glóbulo arbitrario de NAPL será la suma de las fuerzas de gravedad y presión. Esta fuerza neta por unidad de área puede ser representada en términos de sus componentes horizontal y vertical:

$$\frac{F}{A} = -\frac{\partial P}{\partial x} d_b \hat{l} + \left(-\frac{\partial P}{\partial z} d_b - \rho_0 g d_b\right) \hat{k} \quad (13)$$

Donde el diámetro del glóbulo d_b , es usado como la dimensión característica de amplitud y \hat{l} representa un vector unitario en la dirección horizontal (x). En términos de los componentes de la velocidad de Darcy y asumiendo un medio isotrópico la expresión de 13 puede ser rescrita como:

$$\frac{F}{A} = \frac{\mu_w}{KK_{rw}} q_{w1} d_b \hat{l} + \left(\frac{\mu_w}{KK_{rw}} q_{w1} d_b + \Delta \rho g d_b\right) \hat{k} \quad (14)$$

Bajo la condición crítica de movilización la magnitud de esta fuerza será igual al promedio de la fuerza capilar actuando para retener el líquido orgánico:

$$\left\| \frac{F}{A} \right\| = d_b \sqrt{\left(\frac{\mu_w}{KK_{rw}}\right)^2 [(q_w)^2 + (q_w)^2] + (\Delta \rho g)^2} + \frac{2\mu_w}{KK_{rw}} q_{w1} \Delta \rho g = \frac{2\sigma_{ow} \cos \theta \beta}{r_n} \quad (15)$$

Donde β y r_n son ahora representantes de las características del poro promedio del medio. La ecuación 15 puede ser rescrita en términos del Número de Capilaridad (N_{Ca}) y de Bond (N_B)

para encontrar una expresión para un Número Total de Atrapamiento (\mathbf{N}_T). Total Trapping Number:

$$N_T = \sqrt{N_{Ca}^2 + 2N_{Ca}N_B \text{sen}\alpha + N_B^2} = \frac{2KK_{rw}\beta}{r_n d_b} \quad (16)$$

Aquí α es el ángulo que hace el flujo con la abscisa x (en el sentido de las manecillas del reloj).

Para el caso de flujo horizontal $\alpha = 0^\circ$, la ecuación 16 quedaría:

$$N_T = \sqrt{N_{Ca}^2 + N_B^2} \quad (17)$$

De aquí que este desarrollo sugiere que una **suma general de números de bond y capilar pueden ser usados para valorar el potencial de la movilización de un fluido en un poro dando por consecuencia una expresión para un Número Total de Atrapamiento (\mathbf{N}_T). (Total Trapping Number).**

1.5. Cálculo de las \mathbf{K}_H , \mathbf{K} , \mathbf{K}_{eff} y \mathbf{K}_{rw} .

De acuerdo al ASTM D 2434-68 Pág. 365, indica que para encontrar la Conductividad Hidráulica se aplica la siguiente fórmula:

$$K_H = \frac{QL}{A\Delta P} \quad (18)$$

Donde: \mathbf{K}_H (L/t), cm/seg
 \mathbf{Q} (\mathbf{L}^3/\mathbf{t}), GPM ó cm^3/seg
 \mathbf{L} del Tubo Empacado TM-1 (L), cm
 \mathbf{A} del TM-1 (\mathbf{L}^2), cm^2

Posteriormente con la \mathbf{K}_H ¹⁹, calculamos la \mathbf{K} ,¹⁹ de la siguiente manera:

$$K = \frac{K_H \mu_w}{\rho_w g} \quad (19)$$

Donde: \mathbf{K} (\mathbf{L}^2), cm^2

$$\mu_w \quad (\text{M/Lt}), \text{ gr/cm seg}$$

$$\rho_w \quad (\text{M/L}^3), \text{ gr/cm}^3$$

$$g \quad (\text{L/t}^2), \text{ cm/seg}^2$$

Utilizando la Ecuación de Darcy ⁴⁵ tenemos que:

De la ecuación (6):

$$q_w = -\frac{KK_{rw}}{\mu_w}(\nabla P + \rho_w g) \quad (20)$$

Donde: q_w (L/t), cm/seg

K_{rw} adimensional

∇P (M/L²t²), gr/ cm² seg²

$$\text{Sabemos que: } K_{eff}^{19} = \mathbf{K}K_{rw} \quad (21) \quad \text{y} \quad K_{rw} = \frac{K_{eff}}{K} \quad (22)$$

Por lo tanto: la ecuación 20 queda:

$$q_w = \frac{K_{eff}}{\mu_w}(\nabla P + \rho_w g) \quad (23)$$

Y la ecuación 22 queda:

$$K_{eff} = \frac{q_w \mu_w}{(\nabla P + \rho_w g)} \quad (24)$$

También:

$$q_w = \frac{Q}{A} \quad (25)$$

Esta A es el área mencionada en la ecuación 18 y se calcula de la siguiente manera:

$A = \pi (R_H)^2$ (26) Tratándose de un tubo empacado se tiene que utilizar el Radio Hidráulico que se define como:

Volumen de Huecos / Volumen del lecho Empacado / Superficie Mojada del Lecho Empacado / Volumen del Lecho Empacado

Así: Volumen de Huecos / Volumen del Lecho Empacado = ϵ y

$$\text{Superficie Mojada del Lecho Empacado} = \text{No. de Partículas Esféricas } (\pi D_p^2) (1 - \epsilon) \quad (27)$$

$$\text{Volumen del lecho Empacado} = \text{No. de Partículas Esféricas } (1/6 \pi D_P^3) \quad (28)$$

Sustituyendo queda:

$$\text{Superficie Mojada del Lecho Empacado} / \text{Volumen del Lecho Empacado} = \text{No. de Partículas Esféricas } (\pi D_P^2) (1 - \epsilon) / \text{No. de Partículas Esféricas } (1/6 \pi D_P^3) = 6(1 - \epsilon) / D_P \quad \text{así:}$$

$$R_H = \frac{\epsilon D_P}{6(1 - \epsilon)} \quad (29)$$

$$R_H = \frac{\epsilon}{(1 - \epsilon)} \cdot \frac{D_P}{6} \quad (30)$$

Y a través de las ecuaciones 11, 12 y 17 encontramos los Números de Capilaridad, de Bond y el Número Total de Atrapamiento (Total Trapping Number).

1.6. Obtención de la Porosidad de la Arena y de las Esferas de Vidrio.¹⁶

Se encontró la porosidad, de los medios porosos: **Arena 0.833 mm. – 0.617 mm. (20-30 MESH)** y de las **Esferas de Vidrio de 3 mm. de diámetro**, que de aquí en adelante se mencionarán como **Arena y Esferas de Vidrio**:

Se obtuvo la ρ_r a través del método del picnómetro y de acuerdo al ASTM D854-58. Págs. 211-213. Se determinó por diferencia de volúmenes relacionados con su peso, así que el peso se determina pesando directamente la Arena y las Esferas de Vidrio, y el volumen de manera indirecta por el cálculo del peso y la densidad del agua desplazada por las muestras porosas.¹⁶

$$\rho_r = \frac{W_r}{V_r} \quad (31)$$

Donde: ρ_r (gr/cm³)

W_r (gr)

V_r (cm³)

Por supuesto primero se procederá con la Arena y posteriormente con las Esferas de Vidrio

Sabemos que:

$$W_{r \text{ Arena}} = W_{\text{pic} + \text{Arena}} - W_{\text{pic}} \quad (32)$$

$$W_{r \text{ Esferas de Vidrio}} = W_{\text{pic} + \text{Esferas de Vidrio}} - W_{\text{pic}} \quad (33)$$

$$V_{r \text{ Arena}} = \frac{W_{\text{pic} + \text{agua}} - W_{\text{pic}}}{\rho_{\text{agua}}} - \frac{W_{\text{pic} + \text{Arena} + \text{agua}} - W_{\text{pic} + \text{Arena}}}{\rho_{\text{agua}}} \quad (34)$$

$V_{r \text{ Arena}}$ = peso del agua desplazada por partículas de Arena /densidad del agua

$$V_{r \text{ Esferas de Vidrio}} = \frac{W_{\text{pic} + \text{agua}} - W_{\text{pic}}}{\rho_{\text{agua}}} - \frac{W_{\text{pic} + \text{Esferas de Vidrio} + \text{agua}} - W_{\text{pic} + \text{Esferas de Vidrio}}}{\rho_{\text{agua}}} \quad (35)$$

$V_{r \text{ Esferas de Vidrio}}$ = peso del agua desplazada por las Esferas de Vidrio/densidad del agua

$W_{\text{pic} + \text{Arena}}$ (gr) ; $W_{\text{pic} + \text{agua}}$ (gr)

$W_{\text{pic} + \text{Esferas de Vidrio}}$ (gr) ; $W_{\text{pic} + \text{Arena} + \text{agua}}$ (gr)

W_{pic} (gr) ; $W_{\text{pic} + \text{Esferas de Vidrio} + \text{agua}}$ (gr)

ρ_{agua} (gr/cm³)

La ρ_A se determinó por el método de la probeta ¹³, el cual tiene la ventaja de ser muy rápido. Este método consiste en tamizar la arena y posteriormente colocarla en una probeta de volumen (10 ml) y peso conocidos y se golpea 10 veces suavemente pero de manera firme sobre una superficie y se agrega nuevamente arena a la probeta para alcanzar el nivel de volumen marcado. De la misma manera se hace con las esferas de vidrio, por supuesto estas no se necesitan tamizar. Después se coloca en la balanza analítica para obtener el peso tanto de la arena como de las esferas de vidrio, restándole previamente el peso de la probeta. La densidad aparente se obtiene entonces al aplicar la fórmula:

$$\rho_A = \frac{m}{V} \quad (36)$$

Donde: ρ_A (gr/cm³)

m (gr) ; $\hat{\omega}_{\text{probeta}}$ (gr)

V (cm³)

m = $\hat{\omega}_{\text{probeta}}$ + Arena ó Esferas de Vidrio - $\hat{\omega}_{\text{probeta}}$

De esa manera se procede a calcular la porosidad (\mathcal{E}) tanto de la arena, como la de las esferas de vidrio, de acuerdo con la siguiente fórmula ¹⁶

$$\mathcal{E} = \frac{\rho_r - \rho_A}{\rho_r} \quad (37)$$

\mathcal{E} adimensional

Los valores encontrados se muestran en las **Tabla 1.1 y 1.2**, página 23.

Tabla 1.1 Porosidad de la Arena.

W_{pic}	$W_{pic + arena}$	$W_{pic + agua}$	$W_{pic + arena + agua}$	$W_r arena$	$V_r arena$	$\rho_r arena$	$\acute{O}_{probeta}$	$\acute{O}_{probeta + arena}$	m arena	V	$\rho_A arena$	$\epsilon arena$
20.9458	62.2487	45.8117	71.516	41.3029	15.5986	2.6478	30.9766	47.5498	16.5732	10.0	1.6573	0.3740

Tabla 1.2 Porosidad de las Esferas de Vidrio.

W_{pic}	$W_{pic + Esferas de Vidrio}$	$W_{pic + agua}$	$W_{pic + Esferas de Vidrio + agua}$	$W_r Esferas de Vidrio$	$V_r Esferas de Vidrio$	$\rho_r Esferas de Vidrio$	$\acute{O}_{probeta}$	$\acute{O}_{probeta + Esferas de Vidrio}$	m Esferas de Vidrio	V	$\rho_A Esferas de Vidrio$	$\epsilon Esferas de Vidrio$
20.9458	58.6475	45.8117	68.5053	37.7017	15.0081	2.5120	30.9766	47.2061	16.2300	10.0	1.6230	0.3539

CAPÍTULO 2.

ANTECEDENTES

2.1. Tecnologías de Procesos de Remediación de Suelos Contaminados por Hidrocarburos.

5, 7, 8, 10, 12, 13, 21, 22, 24, 26, 42, 44, 56, 57, 59, 60, 64

Las Tecnologías de procesos de

remediación de suelos contaminados por hidrocarburos se ha ido mejorando conforme pasa el tiempo y algunas nuevas tecnologías se encuentran en desarrollo.

En este trabajo consideramos el lavado de suelos contaminados con hidrocarburos por medio de surfactantes.

En general el lavado de suelos es un método de tratamiento basado en extracción con agua, ó agua más aditivos, tales como surfactantes, ácidos y álcalis, este método se desarrolla en laboratorios y a escala piloto. Sabemos que la solubilización de compuestos tanto orgánicos, como de metales pesados en agua con la adición de surfactantes y cosolventes son conocidos, sin embargo se estudian otros métodos usando éstas sustancias.

El lavado de suelos puede también ser aplicado in-situ sin excavación. El diseño general in-situ de los sistemas de lavado de suelos se describe en una publicación reciente de la EPA. La solución limpiadora se esprea o se inyecta sobre la zona contaminada. Un sistema de pozos de extracción se instala corriente abajo de la capa acuífera subterránea para coleccionar y remover posteriormente a los contaminantes.

Varios proyectos in-situ y estudios se han reportado como es el caso de:

- Limpieza de suelos contaminados con sustancias orgánicas, con surfactantes en la base aérea Volk en Campo Douglas, Wisconsin.(mencionado en la Tabla 2.1, página 29)
- Limpieza de Herbicidas con agua en Suecia.
- Limpieza de suelos combinados con Biodegradación para remediación y preservación de madera en ciertos lugares.

2.1.2. El Lavado de Suelos con Surfactantes.

3, 14, 15, 18, 23, 36, 41, 53, 55

El lavado de suelos

con surfactantes, es un método que consiste en remover del suelo los contaminantes que en él se encuentran. Esta técnica consiste en agregar una solución con surfactantes a fin de que ésta solubilice ó movilice de los suelos dichos contaminantes. Cuando se trata de lavado de suelos **in-situ**, generalmente esta solución química se mezcla en el mismo lugar y se introduce en el suelo a través de pozos de inyección verticales u horizontales o mecanismos de irrigación, de tal manera que se percole a través de la matriz del suelo y absorba a los contaminantes a su paso, estos contaminantes son arrastrados verticalmente a través del suelo, hasta llegar al nivel

freático para después migrar con el flujo del agua subterránea y posteriormente recuperar la mezcla del contaminante y surfactante aguas abajo, a través de pozos de extracción o mediante zanjas de recuperación y darle un tratamiento para separar el surfactante y reciclarlo hasta que se obtengan los niveles de limpieza requeridos.

La efectividad de los procesos de lavado de suelos fue sintetizada en una revisión crítica de tecnologías de tratamiento físico/químico para suelos y sedimentos contaminados por compuestos orgánicos, concluyéndose que los surfactantes son una opción aceptable.

El lavado de suelos con surfactantes, puede ser utilizado en forma preliminar o simultánea a los procesos de remoción (solubilización, movilización, biodegradabilidad, etc.) y es recomendable para la desorción de contaminantes tales como metales pesados e hidrocarburos, ambos en altos niveles de concentración. Los factores a tomarse en cuenta para su aplicación son la eficiencia en la recuperación y reuso y la eliminación del surfactante utilizado y adsorción de los surfactantes en el suelo.

Dependiendo de la formulación química particular, los surfactantes pueden provocar una movilización física de los contaminantes. Sin importar que el mecanismo de remoción primaria sea solubilización, movilización o una combinación de las dos. Los fluidos deben ser recuperados del subsuelo y tratados en el sitio o en otro lugar para su disposición.

La aplicación de la solución con surfactante es un método rápido de recuperación de contaminantes del subsuelo. La ventaja de esta tecnología comparada con ciertas tecnologías de lavado de suelos, es la capacidad que tiene para remover grandes cantidades de los contaminantes en un período relativamente corto. Sin embargo, pueden existir riesgos asociados con la aplicación de esta tecnología, como el de extender la contaminación a través de una migración vertical no controlada debido a que no se recupere adecuadamente la solución con el surfactante y el contaminante, e incrementar la concentración de contaminantes en el agua subterránea, y en el caso de la utilización de pozos verticales la posible necesidad de contener a largo plazo los contaminantes no recuperados.

Para llevar a cabo el lavado de suelos con surfactantes, se realiza una evaluación inicial de la aplicación, caracterización del sitio, estudios de laboratorio, simulación numérica, demostración en campo y aplicación a gran escala.

El lavado con surfactantes, es más conveniente en zonas de moderada a alta permeabilidad, donde grandes volúmenes de fluido pueden penetrar a la zona objetivo en un tiempo razonable, un suelo de baja permeabilidad ($K < 10^{-5}$ cm/seg) limitará la habilidad del surfactante a percolar a través de la matriz del suelo. Por eso esta técnica es más efectiva en suelos con permeabilidad de $K < 10^{-3}$ cm/seg. El grado de remoción de contaminante que ocurra durante un lavado con surfactante, deberá ser mejor para las zonas que muestren menor heterogeneidad.

En la mayoría de los sitios, existe una gran variedad de materiales, dando lugar a la heterogeneidad, es decir que tanto su composición como sus propiedades en magnitud y dirección varían de un punto a otro. El grado de heterogeneidad que pueda tener un sitio específico podría ser el factor de control para determinar el grado al cual la mezcla de una sustancia química arrojada puede entrar en contacto con la región contaminada del subsuelo. El éxito o fracaso y el potencial para la aplicación de una tecnología de saneamiento en particular dependerá del grado y tipo de heterogeneidad presente en el subsuelo.

2.1.3. Técnicas Utilizadas en el Lavado de Suelos^{12,14,20}. La técnica de lavado con surfactantes aún se encuentra en desarrollo. Las técnicas in-situ, donde estas pueden ser usadas, a menudo tienen mayor ventaja sobre otras tecnologías en términos de costo, impacto ambiental y destrucción de contaminantes tóxicos. El lavado de suelos con surfactantes in-situ muestra potencial para la remediación de sitios los cuales están contaminados con compuestos orgánicos de baja solubilidad en agua. Éstas técnicas están aún en etapa de desarrollo, pero muestran promesas para la remoción de hidrófobos orgánicos de baja volatilidad tales como los BPC y los hidrocarburos aromáticos poli nucleares de suelos y acuíferos contaminados

A continuación, se presentan algunos estudios que se han realizado en la técnica de lavado con surfactantes, para la remoción de contaminantes y los resultados obtenidos:

David A. Edwards et al.¹⁷ midieron las solubilidades aparentes del naftaleno, fenantreno y pireno en soluciones de surfactantes no-iónicos de polioxietileno (uno del tipo Alquil (POE), dos del tipo octilfenol y uno del tipo nonilfenol). Las solubilidades aparentes de las soluciones de surfactante se determinaron por técnicas de radio trazadores. De sus experimentos encontraron que la solubilidad de estos HPA, incrementaba en forma lineal con las dosis de surfactante a concentraciones acuosas mayores a la CMC. La pendiente de esta relación para

cada solución de surfactante y compuesto de HPA se usó para determinar la MSR y el K_m de la fracción mol de HPA en la fase micelar/fase acuosa. Los compuestos HPA se solubilizaron en el intervalo de ~ 0.04 - 0.4 mol de HPA/ mol de surfactante micelar con valores de K_m en el intervalo de $10^{4.6}$ - $10^{6.5}$. Los valores de $\log K_m$ para un sistema particular surfactante-HPA parecen estar correlacionados con los coeficientes de partición HPA octanol-agua. Estos datos pueden ser usados con información adicional sobre el surfactante y la sorción del HPA sobre el suelo para estimar la solubilidad del HPA en sistemas suelo-agua-surfactante.

2.1.4. Estudios realizados in-situ y en laboratorios. Existen varios estudios relacionados con el lavado de suelos contaminados, con surfactantes, tanto in-situ como en el laboratorio, además de programas matemáticos para predecir la solubilización y movilización de los NAPL, en los estudios utilizan diferentes mecanismos como: solubilización, movilización, biodegradación, usando diferentes tipos de contaminante como: PCE, TCE, HPA, dodecano, fenantreno, aceite de transmisión automática, antraceno en 1,2-diclorobenceno, petróleo crudo, etc., y una diversidad de surfactantes y medios porosos, así como diferentes tipos de columnas, cajas experimentales, in-situ, etc.

A continuación presentamos una tabla comparativa (**Tabla 2.1.**, página 29), en donde indicamos, los autores de los diferentes estudios realizados respecto al lavado de suelos, usando como se dijo anteriormente, distintos surfactantes, contaminantes, columnas, cajas experimentales, etc., así como sus objetivos y conclusiones obtenidas, entre estas tecnologías, cabe aclarar que *solamente una de ellas relaciona la influencia de las fuerzas de flotación y viscosas, sobre la movilización de los NAPL residuales en un medio poroso, llevada a cabo, por el Dr. Kurt D. Pennell et al.*⁴⁵ Razón por la cual se seleccionó esta *innovadora tecnología en el presente trabajo experimental*, para poder comprobar los resultados obtenidos en éste, con los del Dr. Pennell et al., teniendo diferentes condiciones de operación, como flujo más alto, diferente contaminante y surfactante, tubo metálico en lugar de columna de vidrio, además *demonstrar con dichos resultados, que el potencial que tienen esas fuerzas para influenciar la movilización del NAPL, provee una original aproximación, para predecir dicho desplazamiento, durante el lavado de suelos con surfactante.*

Tabla 2.1. Experiencias con lavado de suelos contaminados

Autores	Objetivo del Estudio	Tipo de Contaminante	Medio Poroso	Tipo de Surfactante ó Mezclas	Columna	Mecanismos Supuestos ó Propuestos	Conclusiones Obtenidas
David A. Edwards et al. ¹⁷	Medir las solubilidades aparentes del naftaleno, fenantreno y pireno en soluciones de surfactantes no-iónicos de POE (uno del tipo Alquil POE, dos del tipo octilfenol y uno del tipo nonilfenol).	HPA	-----	Alquil y Alquilfenol-etoxilados	Caja experimental Batch	Solubilización	Encontraron que la solubilidad de estos HPA, incrementaba en forma lineal con las dosis de surfactante a concentraciones acuosas mayores a la CMC. Los compuestos HPA se solubilizaron en el intervalo de ~0.04-0.4 mol de HPA/mol de surfactante micelar con valores de Km en el intervalo de $10^{4.6} - 10^{6.5}$. Los valores de log Km para un sistema particular surfactante-HPA parecen ser correlacionados con los coeficientes de partición HPA octanol-agua. Estos datos pueden ser usados con información adicional sobre el surfactante y la sorción del HPA sobre el suelo para estimar la solubilidad del HPA en sistemas suelo-agua-surfactante.

Autores	Objetivo del Estudio	Tipo de Contaminante	Medio Poroso	Tipo de Surfactante ó Mezclas	Columna	Mecanismos Supuestos ó Propuestos	Conclusiones Obtenidas
Boris N. Aronstein et al ⁴	Efectuar un estudio conducido a determinar si un surfactante no iónico, agregado a la superficie de un suelo arcilloso limoso aumentaría la biodegradación de fenantreno y bifenilo presentes en ese medio poroso.	Fenantreno y bifenilo	Suelo arcilloso limoso	Novel II 1412-56	Experimentación in-situ	Biodegradación	En el estudio se dedujo que el surfactante Novel II 1412-56 a concentraciones de 10µg/L aumenta el rango y extensión de la mineralización del fenantreno y con 100µg/L del mismo surfactante no resultó en lixiviación ni del fenantreno, ni del bifenilo, pero en los productos de la biodegradación fueron encontrados en el suelo lixiviado con el surfactante, de lo cual se deduce que a bajas concentraciones puede ser útil para usarse en la biodegradación in-situ, de lugares contaminados con contaminantes hidrófobos.

Autores	Objetivo del Estudio	Tipo de Contaminante	Medio Poroso	Tipo de Surfactante ó Mezclas	Columna	Mecanismos Supuestos ó Propuestos	Conclusiones Obtenidas
Sun y Puri ⁷²	Investigar la solubilización y movilización de los HPA de un suelo limoso arcilloso, por medio de surfactantes comerciales etoxilados.	HPA	Suelo arcilloso limoso	Comerciales aniónicos, no iónicos y Catiónicos	Vertical	Solubilización y Movilización	De acuerdo a los experimentos se demostró que el surfactante no iónico, inicio movilizandolos HPA del suelo a la fase acuosa, aún en concentraciones muy por debajo de la CMC y a mayores concentraciones del mismo la movilización de los HPA a la fase acuosa se incrementó, con respecto a los surfactantes aniónicos y Catiónicos no demostraron ningún efecto de Solubilización, sino hasta después de alcanzar la CMC.
J.C. Fountain ³⁶	Utilización de surfactantes para incrementar la solubilidad de contaminantes orgánicos. NAPL (PCE).	PCE	Arena Ottawa 40-270 MESH	Mezcla 1:1 Nonilfenol Etoxilato (Witconol NP-100) y ester fosfatado de nonilfenil etoxilato (Rexophos 25-97)	Horizontal y cajas de vidrio horizontales	Solubilización y Movilización	El surfactante (Mezcla 1:1 Nonilfenol Etoxilato (Witconol NP-100) y ester fosfatado de nonilfenil etoxilato (Rexophos 25-97) al 2% produjo una buena solubilización y movilización del PCE al no formar emulsiones en el medio poroso.

Autores	Objetivo del Estudio	Tipo de Contaminante	Medio Poroso	Tipo de Surfactante ó Mezclas	Columna	Mecanismos Supuestos ó Propuestos	Conclusiones Obtenidas
Ang y Abdul ³	Determinar la eficiencia de remoción de un aceite de transmisión automática en un medio poroso de Arena Ottawa 20-30 MESH por medio del surfactante Witconol SN70.	Aceite de transmisión automática	Arena Ottawa 20-30 MESH	Etoxilado (Witconol SN70)	Vertical	Solubilización	Con lavado con agua se obtuvo una eficiencia de Solubilización del 25% y con las soluciones del surfactante con concentraciones 0.5%, 1% y 2% se obtuvo una eficiencia de Solubilización de 55%, 60% y 73% respectivamente.
Linda M. Abriola et al. ⁴⁸	Desarrollar un modelo matemático para describir el aumento de Solubilización de un NAPL en un medio poroso a través de un surfactante.	Dodecano residual	Arena Ottawa 20-30 MESH	Polioxi-etileno sorbitan monooleato	Vertical	Solubilización	Se desarrolló el modelo matemático para describir el aumento de Solubilización de un NAPL en un medio poroso (Arena Ottawa 20-30 MESH), sobre la base de la disposición de la observación experimental y para incorporar una relación límite de transferencia de masa en la interfase y la sorción del surfactante, por lo que se deduce que este modelo está destinado para proporcionar un marco y una base para la aplicación de futuros modelos de sistemas más complejos.

Autores	Objetivo del Estudio	Tipo de Contaminante	Medio Poroso	Tipo de Surfactante ó Mezclas	Columna	Mecanismos Supuestos ó Propuestos	Conclusiones Obtenidas
Silvia Zárate et al. ⁷⁸	Desarrollar la modelación matemática del desplazamiento microscópico de antraceno y 1.2-diclorobenceno, en un medio poroso utilizando un surfactante gemelo comercial usando la técnica de la dinámica de fluidos computacional.	Antraceno en 1.2-diclorobenceno en una concentración de 5gr/L	Arena Ottawa de grano uniforme	Comercial Surfynol 465. Gemelo	Tubo delgado enrollado (24m de longitud y 0.12 pulgadas de diámetro interno)	Movilización	Esta modelación matemática representa eficientemente las curvas de rompimiento de los fluidos desplazantes, originando una metodología que puede ser utilizada para evaluar el desplazamiento en geometrías más complejas que integren la localización de los puntos de inyección y considerar de esta manera la eficiencia de desplazamiento macroscópico, aclarando que la medición precisa de las propiedades físicas y de transporte es de vital importancia para la obtención fidedigna de resultados de simulación.

Autores	Objetivo del Estudio	Tipo de Contaminante	Medio Poroso	Tipo de Surfactante ó Mezclas	Columna	Mecanismos Supuestos ó Propuestos	Conclusiones Obtenidas
James Nash Mason et al. ³⁷	Diseño y desarrollo de una Unidad de Tratamiento in-situ y la evaluación de surfactantes para el lavado de suelos in-situ, para mostrar que los surfactantes removerán contaminantes de suelos con agitación mecánica.	Petróleo crudo en cloruro de metileno	Suelo de Volk Air Nacional Guard Base, Camp Douglas, Wisconsin	Alquil fenol etoxilado y sulfonato de dodecil benceno	Unidad de Tratamiento en Patín (in-situ)	Solubilización y Movilización	El aspecto mecánico de aplicar un surfactante al suelo y controlarlo bajo la capa de un no confinado acuífero para capturar la solución acuosa lavadora (surfactante en solución acuosa), ha demostrado un nicho de oportunidad, resultado que queda para ser direccionado y tratado en otros casos requeridos dando excelentes resultados.
Ellis et al. ¹⁸	Este estudio tiene como objeto probar varios surfactantes comerciales para solubilizar el contaminante existente en una arena Ottawa 40-270 MESH.	BPC	Arena Ottawa 40-270 MESH	Comerciales aniónicos y no iónicos	Vertical	Solubilización	Los surfactantes no iónicos lograron mayor remoción que los surfactantes aniónicos, 93% para hidrocarburos y 98% para los BPC, con una concentración óptima de los surfactantes no iónicos de 0.75%.

Autores	Objetivo del Estudio	Tipo de Contaminante	Medio Poroso	Tipo de Surfactante ó Mezclas	Columna	Mecanismos Supuestos ó Propuestos	Conclusiones Obtenidas
Tammy P. Taylor et al. ⁷³	Investigar los efectos de la relación límite de la Solubilización y de la capa del atrapamiento y subsecuentemente recuperación de una representativa NAPL (PCE) durante el lavado con surfactante.	PCE	Arena Ottawa 20-30 MESH, Arena Ottawa F-70 y Material acuífero Wurt-smith	Polioxietileno sorbitan monooleato (Tween 80)	Vertical y dos cajas de aluminio	Solubilización	Los experimentos en las columnas demostraron que la Solubilización del PCE fue en rango limitado, sin embargo se dio un coeficiente efectivo de transferencia de masa derivado de la concentración del PCE y dicho rango de transferencia de masa está fuertemente dependiendo de la velocidad de Darcy. En las cajas se demostró que ambas la Solubilización de rango limitado y la capa del subsuelo influenciaron en la recuperación del PCE.

Autores	Objetivo del Estudio	Tipo de Contaminante	Medio Poroso	Tipo de Surfactante ó Mezclas	Columna	Mecanismos Supuestos ó Propuestos	Conclusiones Obtenidas
Klaus M. Rathfelder et al. ⁴⁰	Desarrollar y aplicar un modelo numérico a la simulación de la Solubilización y recuperación del NAPL a través de un surfactante y como medio poroso arena Ottawa 20-30 MESH, F-70 y material acuífero Wurtsmith.	PCE	Arena Ottawa 20-30 MESH, Arena Ottawa F-70 y Material acuífero Wurtsmith	Polioxietileno sorbitan monooleato (Tween 80)	Vertical y Tanque (Batch)	Solubilización	La formulación del modelo permite aplicarlo a sistemas heterogéneos multidimensionales y predecir con exactitud los procesos de aumento de Solubilización requeridos para la cuantificación de sistemas de interfase dependiente, Los coeficientes de transferencia de masa pueden ser usados exitosamente para la predicción de experimentos a gran escala. Para predicción exacta de recuperación de NAPL en dos sistemas dimensionales dependiendo del conocimiento de la configuración del NAPL atrapado inicialmente el cual es fuertemente influenciado por la heterogeneidad del suelo.

Autores	Objetivo del Estudio	Tipo de Contaminante	Medio Poroso	Tipo de Surfactante ó Mezclas	Columna	Mecanismos Supuestos ó Propuestos	Conclusiones Obtenidas
Vigon y Rubin ⁷⁶	Este trabajo tiene por objeto probar surfactantes alquilados para mejorar la solubilidad de contaminantes en un material acuífero Wurt-smith y arena Ottawa 20-30 MESH.	BPC	Ottawa 20-30 MESH y Material acuífero Wurt-smith	Alquil y alquilfenol etoxilados	Vertical	Movilización	Los sistemas surfactantes alquilados optimizaron la movilización del antraceno y bifenilos en un 90% con concentraciones de 1 a 5 gr/L de sistemas surfactantes.
Abdul et al. ¹	Evaluar grupos de surfactantes comerciales para remover aceites de transmisión automática en arena Ottawa 20-30 MESH.	Aceite de transmisión automática	Arena Ottawa 20-30 MESH,	Comerciales aniónicos y no iónicos	Vertical	Solubilización	Con lavado con agua se obtuvo una eficiencia de remoción de 23% y con las soluciones de los surfactantes comerciales con concentraciones de 0.1%,0.25% 0.5% y 1%, removieron entre el 56% y 84% del aceite de transmisión automática.
V. Dwarakanath et al. ⁷⁴	Identificar aquellos surfactantes que recuperen 99% de los contaminantes y que muestren baja absorción y poca o nada de conductividad hidráulica durante la experimentación.	PCE, TCE y Jet fuel (JP4)	Arena Ottawa y hill field	Diamil sulfosucinato sódico, dihexil sulfosucinato sódico y dioctil sulfosucinato sódico	Vertical	Solubilización	Las columnas empacadas en el experimento de laboratorio han demostrado que con una buena formulación de surfactante un 99% de NAPL se recupera, con una cantidad pequeña de surfactante 1 a 2 volúmenes de poro adicionándole goma de xantano como polímero.

Autores	Objetivo del Estudio	Tipo de Contaminante	Medio Poroso	Tipo de Surfactante ó Mezclas	Columna	Mecanismos Supuestos ó Propuestos	Conclusiones Obtenidas
Kurt D. Pennell et al. ⁴⁶	Evaluar en cuatro columnas experimentales la recuperación del PCE atrapado en arena Ottawa, utilizando mezclas de surfactantes y un surfactante puro.	PCE	Arena Ottawa 20-30, 40-120 y 40-270 MESH	Mezcla 1:1(Diamil/dioctil sulfosucinato sódico), 4:1 (dihexil/dioctil sulfosucinato sódico) y Polioxietileno sorbitan monooleato	Vertical	Movilización	Con la solución del surfactante Polioxietileno sorbitan monooleato al 4% en dos columnas conteniendo Arena Ottawa 20-30 y 40-120 MESH respectivamente, se logró una movilización del PCE del 90 y 97% respectivamente y con la mezcla de surfactantes (1:1(Diamil/dioctil sulfosucinato sódico), 4:1 (dihexil/dioctil sulfosucinato sódico)) al 4% en las últimas dos columnas conteniendo arena Ottawa 40-270 MESH se logró una movilización del 90 a 99% de PCE.

Autores	Objetivo del Estudio	Tipo de Contaminante	Medio Poroso	Tipo de Surfactante ó Mezclas	Columna	Mecanismos Supuestos ó Propuestos	Conclusiones Obtenidas
Kurt D. Pennell et al. ⁴⁵	Considerar el impacto potencial de las Fuerzas de Flotación y Gravitacionales para la movilización del NAPL en arena Ottawa de diferentes tamaños de grano (20-30, 60-80, 100-120 y 40-270 MESH) con tres surfactantes (4% Witconol 2772, 4% 4:1 Aerosol MA/OT y 4% 1:1 Aerosol AY/OT).	PCE	Arena Ottawa 20-30, 60-80, 100-120 y 40-270 MESH	4% Witconol 2772, 4% 4:1 Aerosol MA/OT y 4% 1:1 Aerosol AY/OT	Vertical y horizontal	Movilización	Los resultados experimentales indican que el valor del Número total de Atrapamiento N_t , debe ser menor que 1×10^{-5} para minimizar el potencial de movilización del NAPL (PCE) y entre un rango de 2×10^{-5} y 5×10^{-5} para iniciar la movilización, mientras que para la movilización total del PCE fue observado en un N_t aproximado de 1×10^{-3} .

Como se dijo anteriormente, se puede observar en la **Tabla 2.1**, que se han considerado distintos surfactantes, contaminantes, columnas, cajas experimentales, estudios de Solubilización, Biodegradación, Movilización, Modelos Matemáticos, etc., así como sus objetivos y conclusiones obtenidas, en estas tecnologías, sin embargo, cabe aclarar que *solamente una de ellas relaciona la influencia de las fuerzas de flotación y viscosas, sobre la movilización de los glóbulos de NAPL residuales en un medio poroso, llevada a cabo, por el Dr. Kurt D. Pennell et al.* ⁴⁵

Razón por la cual se seleccionó esta *innovadora tecnología en el presente trabajo experimental*, para poder comprobar los resultados obtenidos en éste, con los del Dr. Pennell et al., *esto es importante ya que es el único estudio que considera lo que se dijo: Usar fuerzas de flotación y viscosas para predecir la movilización de los glóbulos de NAPL residuales, existentes en los medios porosos no consolidados, utilizando Números Adimensionales, como: N_{Ca} (Número de Capilaridad), N_B (Número de Bond) y el N_T (Número Total de Atrapamiento), los cuales fueron propuestos por el Dr. Pennell*, aclarando que en este trabajo se usaron diferentes condiciones de operación, de las que utilizó en su estudio el Dr. Kurt Pennell, como flujo más alto, diferente contaminante y surfactante, tubo metálico en lugar de columna de vidrio, además *demostrar con dichos resultados, el potencial que tienen esas fuerzas en Influenciar la movilización del NAPL, lo cual provee una original aproximación, para predecir dicho desplazamiento, durante el lavado de suelos con surfactante.*

Por lo tanto en este trabajo como se mencionó en el **punto 2.1.4.**, nuestro objetivo será considerar las Fuerzas de Flotación y de Gravedad en glóbulos de contaminante retenidos en un Medio Poroso No Consolidado, con la diferencia que se estudiarán condiciones distintas a las que el Dr. Kurt D. Pennell estudió, como es el contaminante que en nuestro caso es Antraceno en Ortodiclorobenceno en 5 gr/L, el surfactante para nosotros es un Gemelo no Iónico (Surfynol 465), velocidades de Darcy mayores, en lugar de columnas tendremos un tubo metálico horizontal.

CAPÍTULO 3.

EXPERIMENTACIÓN

3.1.1. Planeación de la Experimentación. Para esta Experimentación se seleccionó un surfactante gemelo no iónico denominado Surfynol 465, en solución acuosa. La concentración utilizada fue de 70 gr/L, (valor que se obtiene de la **Figura No. 3.4**, donde se cruzan las dos curvas Emulsión/Agua y Contaminante/Agua, basadas en el Método de Winsor). Se utilizaron dos tipos de Medio Poroso, que fueron Arena y Esferas de Vidrio, un medio natural y otro artificial, para simular los suelos naturales, Los contaminantes usados fueron Antraceno (Hidrocarburo Poli aromático con un Peso Molecular de 178.2 gr/grmol), y el Ortodichlorobenceno (Hidrocarburo Aromático Clorado con un Peso Molecular de 147 gr/grmol), también para identificar el contaminante en las corridas se seleccionó un Colorante llamado Sudan III en 10 ppm, se utilizó un Equipo Paquete en un patín consistente en una Bomba de ½ HP, un Tubo Circular de Acero Inoxidable de un metro de longitud y 5 cm. de diámetro interno, dos Transductores de Presión, una Válvula de Relevo y un Regulador de Presión, además se colocó un Rotámetro para controlar el flujo deseado en la Experimentación y un Tanque Acumulador de 40 litros.

3.1.2. Descripción del Equipo Experimental. En las **Figuras No. 3.1. y 3.2.**, se muestran un esquema y la fotografía del equipo que se usó para los experimentos, describiendo a continuación cada uno de los equipos y accesorios importantes:

- a) Tanque Acumulador **F-1** de surfactante gemelo Surfynol 465.
- b) Bomba de Embolo con Émbolos gemelos **B-1** de una capacidad de 5.7 L/min y ½ HP. Que impulsará el surfactante gemelo a través del tubo empacado.
- c) Transductores **M-1** y **M-2**. Para medir el Gradiente de Presión por medio del Software denominado “Cinda Electrónica Automatización Total. Señales de Laboratorio“.
- d) Válvula Reguladora de Presión **VRP-1**. Para regular las diferentes presiones a que es sometido el sistema.
- e) Rotámetro **R-1**. para la medición de los diferentes caudales a que se someterá el tubo empacado.
- f) Tubo Empacado **TM-1** de 5 cm. de diámetro y 1 m de longitud, que en su interior se empacó con Arena y posteriormente con Esferas de Vidrio.

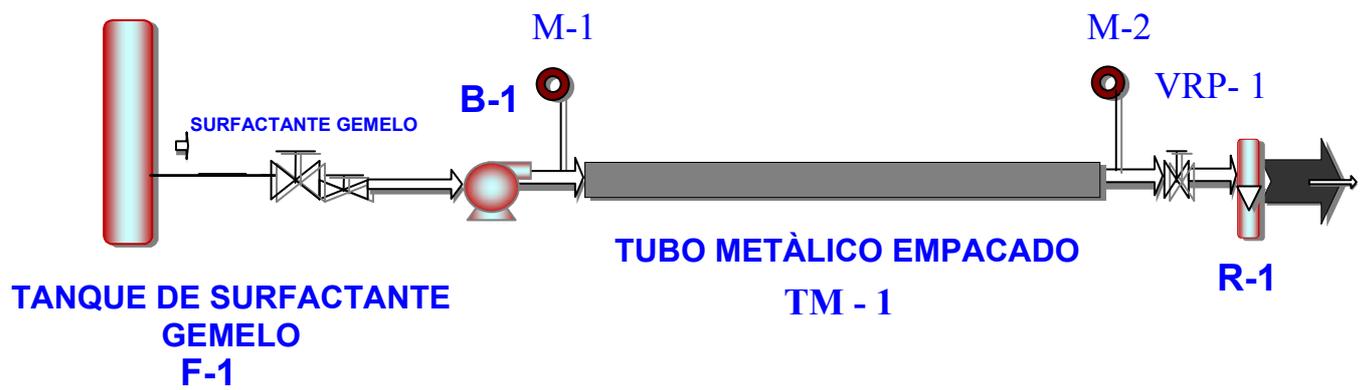


Figura No. 3.1. Esquema del equipo usado en la experimentación



Figura No. 3.2. Fotografía del equipo usado en la experimentación.

3.1.3. Método Experimental

Se utilizó un tubo en posición horizontal de 5 cm. de diámetro y 1 m. de longitud empacado primero con Arena y después con Esferas de Vidrio, para investigar la movilización de una fase orgánica (5 gr/L de antraceno en ortodichlorobenceno) como contaminante, por medio un flujo de surfactante gemelo (Surfynol 465). Para inducir dicha movilización, la tensión interfacial entre el NAPL residual y la fase acuosa fue reducida de 23.6 a 1.7 dinas/cm, relacionando la influencia de las fuerzas de flotación y viscosas, sobre dicha movilización de los NAPL residuales en el medio poroso.

El Método se describe a continuación:

Los experimentos se llevaron a cabo siguiendo los procedimientos descritos por el Dr. Kurt D. Pennell et al.,⁴⁶ para las 20 corridas que se efectuaron:

Se inicia encontrando la K , del medio poroso, a través de la K_H , para esto, el medio poroso se satura con agua destilada desgasificada, que se encuentra en el tanque **F-1**, a través de la bomba **B-1**, lo anterior con el fin de simular la zona saturada del suelo, una vez saturado el medio poroso, se hicieron 5 corridas para cada medio poroso, a diferentes flujos(Q) (flujos manejados 1.2, 1.1, 1.0, 0.9 y 0.85 GPM), que son medidos en el rotámetro **R-1**, registrándose el gradiente de presión a través de los transductores de presión (**M-1** y **M-2**), colocados a la entrada y a la salida del tubo empacado **TM-1**, sus señales se registran directamente en la computadora.

Una vez que se obtuvieron los gradientes de presión se procedió al cálculo de la K_H a través de la ecuación 18 página 18 y la K ecuación 19 página 18.

Después de haber encontrado la K_H y la K del medio poroso, se procede a establecer una saturación residual de contaminante (antraceno en ortodichlorobenceno con una concentración de 5 gr/L, coloreada mediante Sudan III a 10 ppm), en el tubo empacado **TM-1**, esto se efectuó inyectándole el 70 % de Volumen de Poro de contaminante.⁴⁶

El Volumen del **TM-1** sin empacar es de 1,963.5 cm³, ya que:

$$\text{Volumen del Cilindro} = \pi r^2 L \quad (38)$$

$$\text{Por lo tanto el } V_p = \text{Volumen del Cilindro} (\epsilon) \quad (39)$$

$$V_{p \text{ Arena}} = 1,963.5 \times 0.3740 = 734.35 \text{ cm}^3$$

$$V_{p \text{ Esferas de Vidrio}} = 1,963.5 \times 0.3539 = 694.88 \text{ cm}^3$$

Una vez que se establecen los Volúmenes de Poro se calcula el 70 % del mismo para la inyección correspondiente. ⁴⁶

70 % de Volumen de Poro **Arena** = $(734.35 \times 0.7) = 514 \text{ cm}^3$ de contaminante

70 % de Volumen de Poro **Esferas de Vidrio** = $(694.88 \times 0.7) = 486 \text{ cm}^3$ de contaminante

Una vez que se consigue inundar el 70 % del volumen de poro con el contaminante, se satura el medio poroso, posteriormente se bombea el agua destilada a través de la **B-1**, hasta eliminar el contaminante presente en exceso en el **TM-1**, observando que ya no salga la solución coloreada (contaminante con colorante Sudan III), eso quiere decir que se consiguió una concentración residual uniforme del contaminante dentro del medio poroso, cuantificándose este volumen representativo de la concentración residual del NAPL, con el que realizamos un balance posterior que nos indicó la cantidad de contaminante residual atrapado por el medio poroso y el movilizado por el surfactante y obtuvimos de esa manera el % de Saturación.

Arena:

Volumen bombeado (70 % de Volumen de Poro) = 514 cm^3

Volumen recuperado = 508 cm^3

Volumen residual (retenido en el **TM-1**) = $514 - 508 = 6 \text{ cm}^3$

Volumen residual (movilizado en el **TM-1** por surfactante) = 5.921 cm^3 . Ver Tabla en **Anexo 1.3**, página 98.

O sea que tenemos un volumen no movilizado de 0.079 cm^3 (**1.31 %**) y una eficiencia del **98.69 %** de recuperación.

Esferas de Vidrio:

Volumen inyectado (70 % de Volumen de Poro) = 486 cm^3

Volumen recuperado = 482 cm^3

Volumen residual (retenido en el **TM-1**) = $486 - 482 = 4 \text{ cm}^3$

Volumen residual (movilizado en el **TM-1** por surfactante) = 3.797 cm^3 . Ver Tabla en **Anexo 1.3**, página 98.

O sea que tenemos un volumen no movilizado de 0.203 cm^3 (**5.08 %**) y una eficiencia del **95 %** de recuperación.

Nuevamente se hace pasar agua destilada al **TM-1**, a diferentes flujos (flujos manejados 1.2, 1.1, 1.0, 0.9 y 0.85 GPM), registrando el gradiente de presión por medio de los transductores de presión directamente en la computadora hasta que se mantenga constante.

Una vez que se obtuvieron los gradientes de presión con saturación residual de contaminante, se procedió al cálculo de la K_{eff} a través de la ecuación 24 página 19 y la K_{rw} ecuación 22 página 19.

Cuando el tubo empacado **TM-1**, se encuentra con concentración residual en su interior, una vez con Arena y la otra con las Esferas de Vidrio, se hace pasar el surfactante gemelo Surfynol 465, con una concentración de 70 gr/L que se encuentra en el tanque **F-1**, por medio de la bomba de embolo **B-1**, una vez que se obtienen las 10 muestras de contaminante movilizado de las corridas experimentales (**Tabla 3.1.**), se analizaron para saber las concentraciones obtenidas de contaminante a través de un Cromatógrafo de Líquidos de Alta Resolución (HPLC) Perkin-Elmer Serie 200 acoplado a un Detector UV/vis Serie 200 y una Columna Spheri – 5 μ , Fase Estacionaria Silica C-18, acoplado al Software del Turbochrom de Perkin-Elmer, para analizar dichas muestras se necesitó encontrar la fase móvil, que presentara la mejor separación en los tiempos de retención del antraceno y del ortodichlorobenceno, así como, la intensidad del pico mayor de cada uno de ellos, en un tiempo de análisis razonable. Después de probar varias fases móviles, la que resultó adecuada por dar buenos resultados fue la que tuvo una proporción *50:25:25 de Metanol, Acetonitrilo y Agua* respectivamente. Los resultados de las Curvas de Calibración se muestran en el **Anexo 1.1.** Página 91.

Tabla 3.1. Volúmenes de Muestra de Contaminante Obtenido

Corrida	Flujo (GPM)	Material Poroso	Volumen Muestra Obtenido (litros)
1	1.2	Arena	6.7
2	1.1	Arena	5.3
3	1.0	Arena	4.6
4	0.9	Arena	3.5
5	0.85	Arena	3.0
1	1.2	Esferas de Vidrio	5.5
2	1.1	Esferas de Vidrio	4.3
3	1.0	Esferas de Vidrio	3.6
4	0.9	Esferas de Vidrio	3.0
5	0.85	Esferas de Vidrio	2.3

De estos volúmenes se toma una alícuota de cada uno en viales que se colocan en el HPLC, el cual se programó por 25 minutos, que es el tiempo en donde aparecen los picos de Antraceno y

Ortodiclorobenceno de acuerdo a su Longitud de Onda (λ) (Antraceno 245 nm y Ortodiclorobenceno 224 nm), los Cromatogramas del antraceno y del ortodiclorobenceno se muestran en el **Anexo 1.2**. Página 94.

En este Trabajo se consideró encontrar el Gradiente de Presión (ΔP) Teórico y así efectuar comparación entre los valores experimentales encontrados y los Teóricos obtenidos, para lo cual se utilizó la ecuación de ergun.⁵³

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{150\bar{V}_0\mu(1-\varepsilon)^2}{g_c\Phi_s^2D_p^2\varepsilon^3} + \frac{1.75\rho\bar{V}_0^2(1-\varepsilon)}{g_c\Phi_sD_p\varepsilon^3} \quad (40)$$

3.1.4 Descripción General de los Materiales Usados.

3.1.4.1. Características de los Materiales. A continuación se describen cada una de las características de los materiales empleados en este experimento:

SURFACTANTE GEMELO:

Propiedades	Surfynol 465 (Air Products & Chemicals, Inc.)
Nombre Químico	Acetilénico Etoxilado
Clasificación	No Iónico
Viscosidad @ 25°C	0.796 Cps ⁷⁸
Densidad @ 25°C	1.003 gr/cm ³
pH	7
HLB	13
Solubilidad en Agua	100%
Compuestos Volátiles Orgánicos % Peso	<0.01

CONTAMINANTES: Antraceno, Hidrocarburo Poli Aromático;
Ortodiclorobenceno, Hidrocarburo Aromático Clorado,

PROPIEDADES

Nombre Químico	Antraceno ³⁰
Estado Físico: Aspecto	Cristales blancos ó copos
Peso Molecular	178.2
Solubilidad en Agua	Ninguna

Nombre Químico	1,2-Diclorobenceno ³¹
Estado Físico: Aspecto	Líquido viscoso entre incoloro y amarillo pálido, de olor característico
Peso Molecular	147
Densidad Relativa (agua=1)	1.3
Solubilidad en Agua	Ninguna

MEDIOS POROSOS: Arena y Esferas de Vidrio, un medio natural y otro artificial, para simular los suelos naturales

DATOS TÉCNICOS

Nombre Comercial	Arena Sílica 0.833mm-0.617mm (20-30 MESH) $d_{50}=0.725$ mm.
Propiedades Físicas Típicas:	Peso Especifico: 2.4 – 3.0; Dureza Mohr: 7; pH: 7.0
Análisis Químico Típico:	SiO ₂ : 83 – 88 %; Fe ₂ O ₃ : 1 – 2 %; Al ₂ O ₃ : 1 – 2 %
Granulometría	M – 20: 50.1 %; M – 30: 45.5%

Nombre Comercial	Esferas de Vidrio (Glass Beads). Esferas de Vidrio de 3 mm. de diámetro (6 – 8 MESH)
Propiedad Física Típica:	Peso Especifico: 2.52

COLORANTE: 10 ppm. Para identificar el contaminante en las corridas experimentales

PROPIEDADES

Nombre Químico	Sudan III
Fórmula Molecular	C ₂₂ H ₁₆ N ₄ O
Estado Físico: Aspecto	Polvo color rojo
Peso Molecular	352.39
Número CAS	85-86-9

3.1.5. Determinación de la CMC. Se utilizó un Tensiómetro manual Marca CSC Tipo du Noüy, para medir la tensión superficial del Surfactante Gemelo (Surfynol 465), previa calibración del mismo, a diferentes concentraciones con el método de desprendimiento del anillo, que consiste en medir la fuerza necesaria para desprender un anillo horizontal de alambre de la superficie del líquido (surfactante gemelo) y de esa manera encontrar su CMC.

Los resultados se muestran en el **Anexo 1.4.** Página 102.

3.1.6. Determinación de la Concentración del Surfactante Gemelo Surfynol 465 a través del Método de Winsor. Ésta determinación se efectuó y se obtuvo el diagrama de la concentración, utilizando el mismo contaminante del experimento como NAPL (solución de antraceno en ortodichlorobenceno a 5 gr/L, debido a que ambos son contaminantes más densos que el agua y además son ejemplos clásicos de los contaminantes que se encuentran en el subsuelo, uno clorado y otro poli cíclico).

Para lo anterior se prepararon soluciones del surfactante gemelo (surfynol 465) con agua destilada (2 ml), a varias concentraciones (de 0.001 gr/L a 100 gr/L), en 15 viales de cuatro mililitros (4 ml.) de vidrio, complementando el volumen con dos mililitros (2 ml) de solución

del contaminante, agitando vigorosamente el vial y controlando su temperatura, en este caso se cuenta con un cuarto con calefacción y un termómetro-higrómetro marca Radio Shack, con el cual se mantuvo una temperatura de 25°C y una humedad del 30% para evitar variaciones de temperatura humedad que pudieran falsear los resultados.

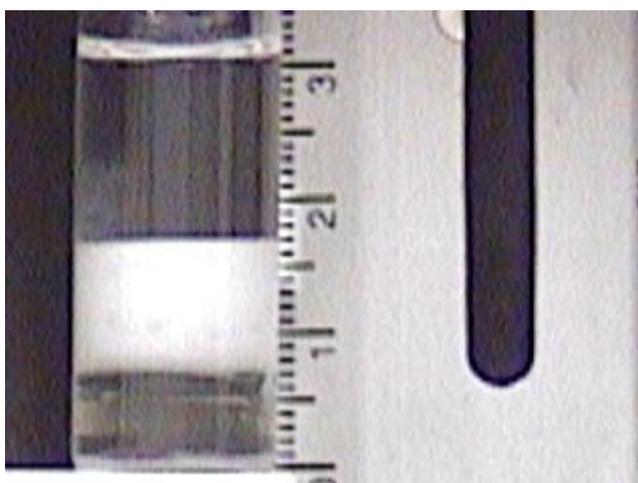
Los viales se dejaron **288 horas**, tiempo suficiente para observar una clara separación de fases, obteniéndose al lapso de ese tiempo los datos necesarios para construir adecuadamente el diagrama de concentración del surfactante gemelo Surfynol 465 y seleccionar la concentración para la experimentación.

Es importante indicar que el tamaño de estas fases (se mide la altura de cada una de ellas obteniéndose la fracción volumen (Relación), dado que el diámetro de los viales es constante en toda su altura), es vital para la elaboración del diagrama. Para tal fin se utilizó una cámara digital para tomar fotos de los viales.

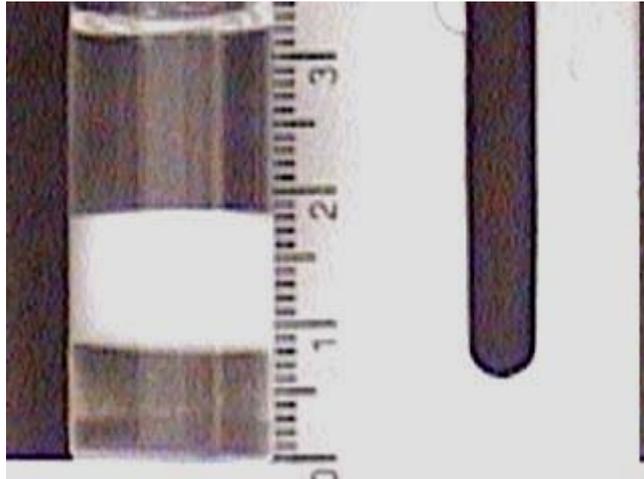
Tabla 3.2. Concentraciones Utilizadas en los Viales para determinar las Fases de Winsor

Vial Número	Concentración de Surfactante (gr/L)	Concentración de Contaminante
1	30.00	5 gr/L
2	50.00	5 gr/L
3	70.00	5 gr/L
4	100.0	5 gr/L

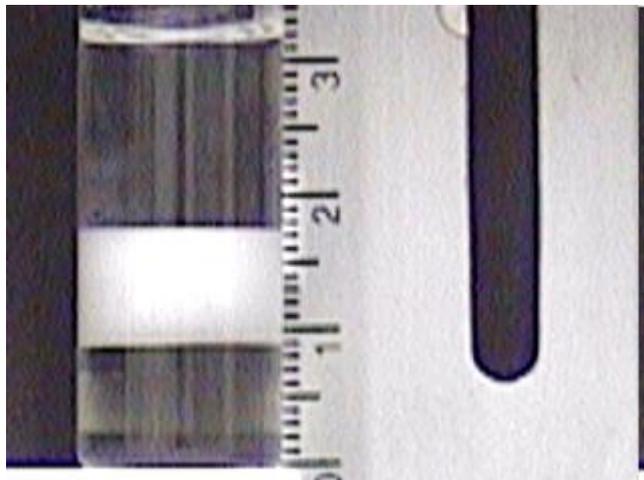
A continuación se presentan las imágenes de los viales preparados con el comportamiento de Winsor tipo I, Winsor tipo II y con Winsor tipo III, para las concentraciones de 30 gr/L, 50 gr/L, 70 gr/L. y 100 gr/L.



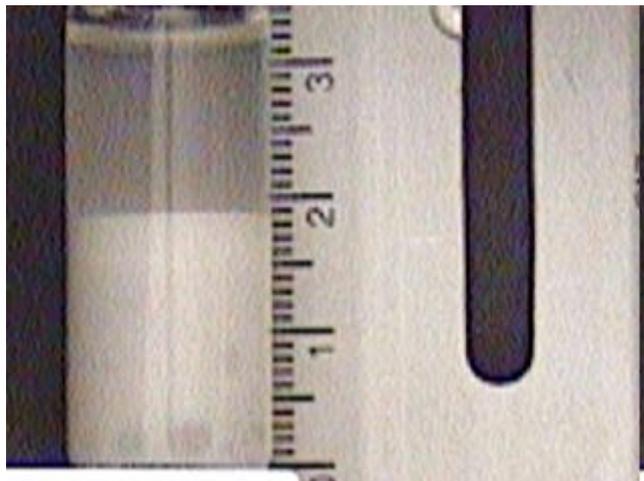
**Figura No. 3.3 a. Fotografía Vial No.12 (30.0 gr/L)
Winsor Tipo III**



**Figura No. 3.3 b. Fotografía Vial No. 13 (50.0 gr/L)
Winsor Tipo III**



**Figura No. 3.3 c. Fotografía Vial No. 14 (70.0 gr/L)
Winsor Tipo III**



**Figura No. 3.3 d. Fotografía Vial No. 15 (100.0 gr/L)
Winsor Tipo II**

Se observa no hay Winsor Tipo I lo que quiere decir que no hay fase orgánica en la parte superior del vial, toda se movilizó al surfactante.

Con el tiempo suficiente (48 horas), los Sistemas de los Viales hacen una clara separación de fases. El tamaño de estas fases es importante para la construcción de la Gráfica de la Concentración del Surfactante Surfynol 465 para la experimentación, por lo tanto tiene que ser medido, con la siguiente expresión matemática:

- La Relación de Volúmenes para la Emulsión será:

$$\text{RELACIÓN} = \text{Volumen de la fase Emulsión} / \text{Volumen de la fase Agua}$$

$$\text{RELACIÓN} = \pi r^2 (\text{altura de la fase Emulsión}) / \pi r^2 (\text{altura de la fase Agua})$$

$$\text{RELACIÓN} = \text{altura de la fase Emulsión} / \text{altura de la fase Agua} \quad y$$

- La Relación de Volúmenes para el Contaminante será:

$$\text{RELACIÓN} = \text{Volumen de la fase Contaminante} / \text{Volumen de la fase Agua}$$

$$\text{RELACIÓN} = \pi r^2 (\text{altura de la fase Contaminante}) / \pi r^2 (\text{altura de la fase Agua})$$

$$\text{RELACIÓN} = \text{altura de la fase Contaminante} / \text{altura de la fase Agua}$$

De los datos anteriores construimos la siguiente tabla:

Tabla 3.3. Concentración del Surfactante Surfynol 465 a utilizarse en la Experimentación

Concentración (mg/L)	Volumen Fase Emulsión/Volumen Agua	Volumen Fase Contaminante/Volumen de Agua
30.0	0.7143	0.5384
50.0	0.7143	0.5714
70.0	0.6031	0.6031
100.0	1.4200	0.0000

Y de los valores anteriores se construye la Gráfica siguiente:

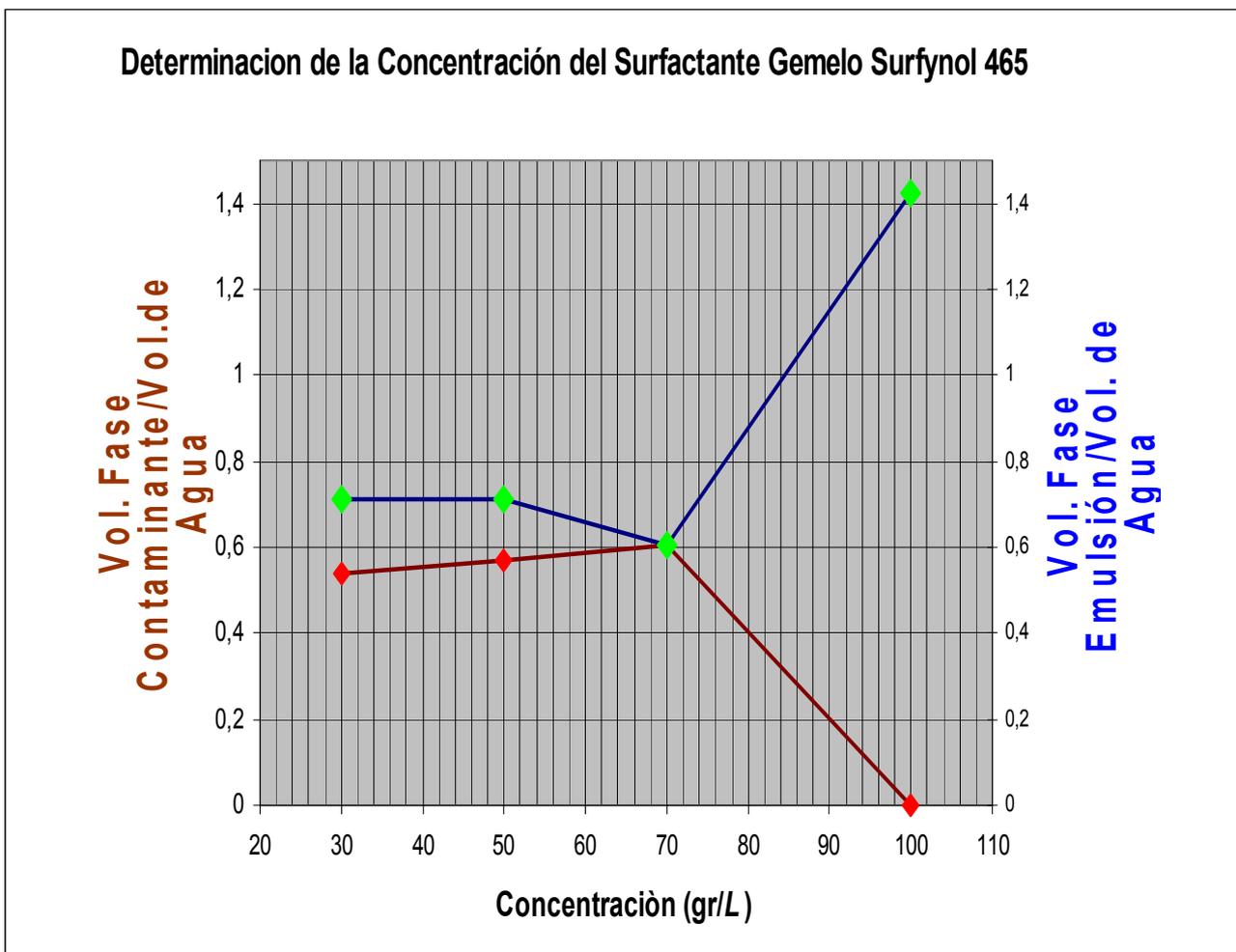
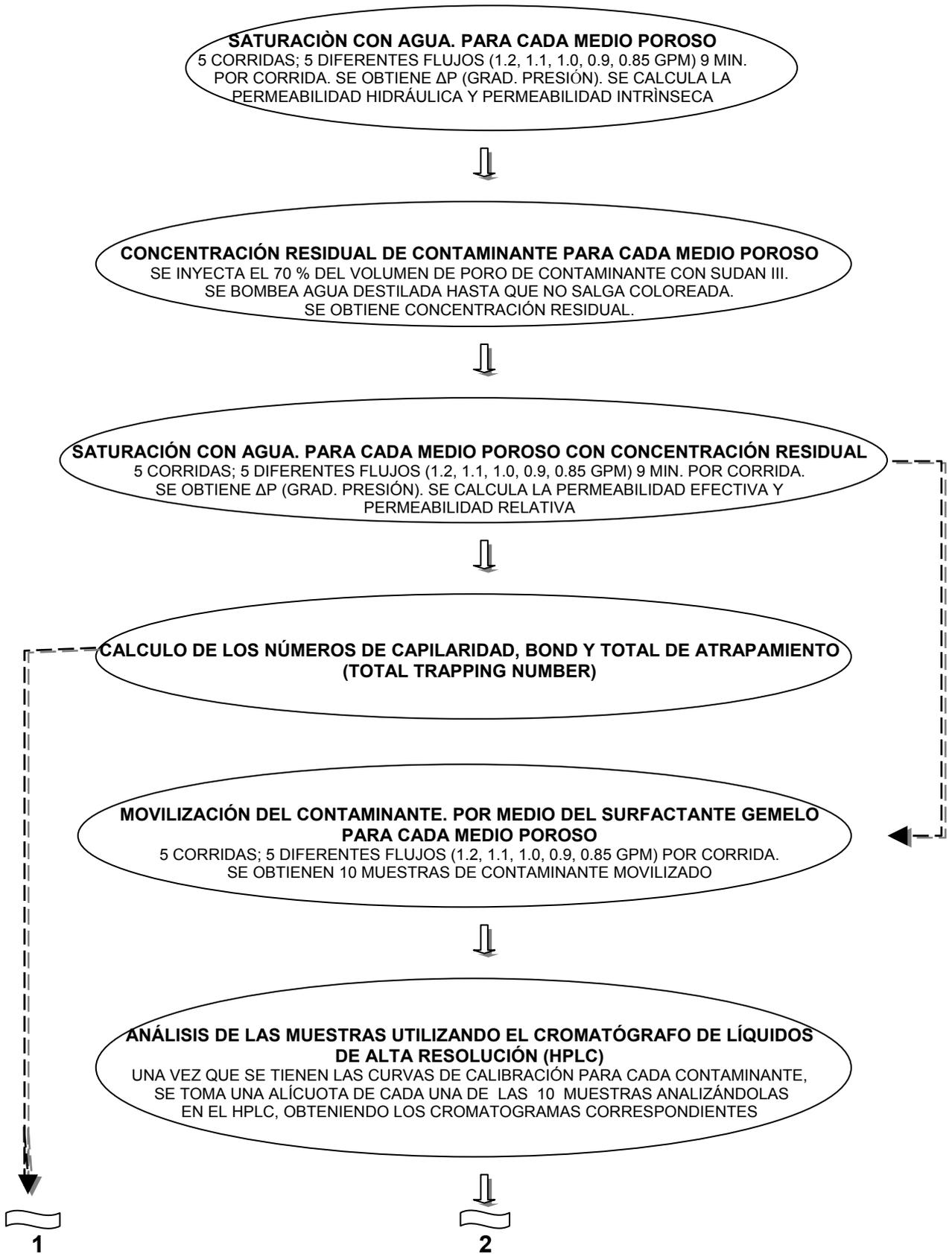
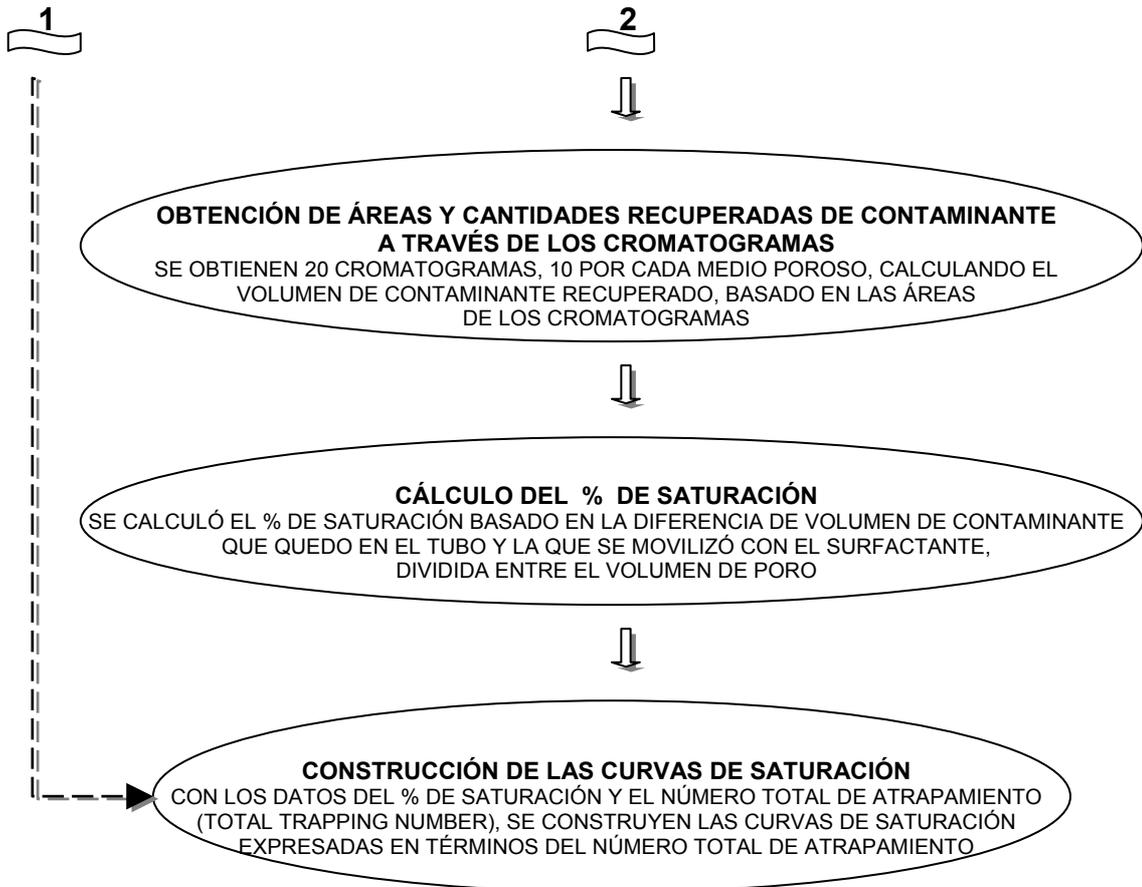


Figura No. 3.4. Concentración del Surfactante Gemelo Surfynol 465

En la Gráfica se observa que el cruce de las dos curvas, da un valor de concentración de 70 gr/L, por lo que esta concentración se considerará en la experimentación, basado en este resultado.

3.1.7 Diagrama de Flujo del Proceso Experimental.





CAPÍTULO 4.

RESULTADOS

4.1. Resultados Experimentales y Teóricos para esferas de vidrio.

Siguiendo el procedimiento descrito por el Dr. Kurt Pennell,⁴⁶ se obtuvieron los **valores experimentales** del **gradiente de presión (ΔP)**, a través de los transductores de presión como se indicó en el capítulo 3.1.3, página 44 y los **valores teóricos**, utilizando la ecuación de ergun⁵³ ecuación 40, página 47, para ambos medios porosos.

4.1.1. Valores del Gradiente de Presión (ΔP).

Tabla 4.1. Valores Experimentales.

No. de Corrida	Tiempo (minutos)	Flujo (GPM)	Valor Experimental promedio Gradiente de Presión (ΔP) PSI
1	1, 2, 2.8, 3.2, 4.2, 6	1.2	2.16
2	0.3, 1.2, 2.1, 3.5, 4, 5.7	1.1	1.83
3	0.1, 2.9, 4.9, 5.9, 6.2, 6.6	1.0	1.50
4	0.5, 1.7, 2.9, 5, 9	0.9	1.20
5	0.9, 1.5, 2.1, 2.4, 3.6, 4, 4.8, 6	0.85	1.12

Para los valores teóricos utilizamos:

densidad 61.6806 lb/ft³, viscosidad 6.4173135 X 10⁻⁴ lb/ft-seg, diámetro partícula 9.84252 X 10⁻³ ft

Tabla 4.2. Valores Teóricos.

No. de Corrida	Velocidad (ft/seg)	Valor Teórico Gradiente de Presión (ΔP) PSI
1	0.1265	2.11
2	0.1212	1.95
3	0.1160	1.79
4	0.1107	1.65
5	0.1054	1.50
6	0.1001	1.37
7	0.0948	1.24
8	0.0917	1.17
9	0.0896	1.12

De acuerdo al procedimiento descrito por el Dr. Kurt Pennell, ⁴⁶ se obtuvieron los **valores experimentales** de K_H , K , K_{eff} y K_{rw} , utilizando el valor del **gradiente de presión (ΔP)** experimental, como se indicó en el capítulo 3.1.3 páginas 44, 45 y 46, utilizando las ecuaciones 18 y 19 página 18 y las ecuaciones 22 y 24 página 19 y para los **valores teóricos**, utilizamos el **gradiente de presión (ΔP)** teórico, un área transversal de $2.356 \times 10^{-3} \text{cm}^2$ y las mismas ecuaciones para ambos medios porosos.

4.1.2. Valores de K_H y K .

Tabla 4.3. Valores Experimentales.

Q (cm ³ /seg)	ΔP (psi) (cm H ₂ O)	K_H (cm/seg)	K (cm ²)
75.700	(2.16) (151.8264)	2.1163×10^4	0.2085
69.390	(1.83) (128.6307)	2.2897×10^4	0.2256
63.080	(1.50) (105.4350)	2.5394×10^4	0.2502
56.775	(1.20) (84.3480)	2.8570×10^4	0.2815
53.620	(1.12) (78.7248)	2.8909×10^4	0.2848

⊕ Tabla 4.4. Valores Teóricos.

Q (cm ³ /seg)	ΔP (psi) (cm H ₂ O)	K_H (cm/seg)	K (cm ²)
75.700	(2.11) (148.3119)	2.1664×10^4	0.2135
72.551	(1.95) (137.0655)	2.2467×10^4	0.2214
69.390	(1.79) (125.8191)	2.3409×10^4	0.2306
66.242	(1.65) (115.9785)	2.4243×10^4	0.2389
63.080	(1.50) (105.4350)	2.5394×10^4	0.2502
59.934	(1.37) (96.2973)	2.6417×10^4	0.2603
56.775	(1.24) (87.1596)	2.7648×10^4	0.2724
54.886	(1.17) (82.2393)	2.8327×10^4	0.2791
53.620	(1.12) (78.7248)	2.8909×10^4	0.2848

4.1.3. Valores de K_{eff} y K_{rw} .

Tabla 4.5. Valores Experimentales.

q_{rw} (cm/seg)	ΔP (psi) (Kg./cm ²)	K_{eff} (cm ²)	K_{rw}
3.2131×10^4	(2.16) (0.1519)	0.1248	0.5985
2.9452×10^4	(1.83) (0.1287)	0.1261	0.5589
2.6774×10^4	(1.50) (0.1055)	0.1286	0.5140
2.4098×10^4	(1.20) (0.1012)	0.1281	0.4551
2.2759×10^4	(1.12) (0.0787)	0.1322	0.4641

Tabla 4.6. Valores Teóricos.

q_w (cm/seg)	ΔP (psi) (Kg./cm ²)	K_{eff} (cm ²)	K_{rw}
3.2131 X 10 ⁴	(2.11) (0.1371)	0.1266	0.5930
3.0794 X 10 ⁴	(1.95) (0.1483)	0.1271	0.5741
2.9452 X 10 ⁴	(1.79) (0.1258)	0.1276	0.5533
2.8116 X 10 ⁴	(1.65) (0.1160)	0.1275	0.5337
2.6774 X 10 ⁴	(1.50) (0.1055)	0.1286	0.5140
2.5439 X 10 ⁴	(1.37) (0.0963)	0.1269	0.4875
2.4098 X 10 ⁴	(1.24) (0.0872)	0.1316	0.4831
2.3296 X 10 ⁴	(1.17) (0.0823)	0.1253	0.4489
2.2759 X 10 ⁴	(1.12) (0.0787)	0.1322	0.4641

4.1.4. Valores de N_{Ca} , N_B y N_T

Con los datos obtenidos experimentalmente y teóricamente, de la K y K_{rw} y utilizando las ecuaciones 11 y 12 página 17 y ecuación 17 página 18, propuestas por el Dr. Kurt Pennell et al¹, se calcularon los números adimensionales correspondientes **para ambos medios porosos**.

Tabla 4.7. Valores Experimentales.

Fluido Desplazante	q_w (cm/seg)	K (cm ²)	K_{rw}	N_{Ca}	N_B	N_T
Agua	3.2131 X 10 ⁴	0.2085	0.5985	13.0022	1.5562	13.0950
Surfynol 465	3.2131 X 10 ⁴	0.2085	0.5985	180.5006	21.6051	181.7890
Agua	2.9452 X 10 ⁴	0.2256	0.5589	11.9181	1.5725	12.0193
Surfynol 465	2.9452 X 10 ⁴	0.2256	0.5589	165.4509	21.8301	166.8848
Agua	2.6774 X 10 ⁴	0.2502	0.5140	10.8344	1.5912	10.9506
Surfynol 465	2.6774 X 10 ⁴	0.2502	0.5140	150.4069	22.0898	152.0161
Agua	2.4098 X 10 ⁴	0.2815	0.4551	9.7515	1.5974	9.8815
Surfynol 465	2.4098 X 10 ⁴	0.2815	0.4551	135.3741	22.1764	137.1785
Agua	2.2759 X 10 ⁴	0.2848	0.4641	9.2097	1.5563	9.3402
Surfynol 465	2.2759 X 10 ⁴	0.2848	0.4641	127.8520	21.6050	129.6646

Tabla 4.8. Valores Teóricos.

Fluido Desplazante	Q_w (cm/seg)	K (cm ²)	K_{scw}	N_{Ca}	N_B	N_T
Agua	3.2131 X 10 ⁴	0.2135	0.5930	13.0022	1.5787	13.0977
Surfynol 465	3.2131 X 10 ⁴	0.2135	0.5930	180.5006	21.9167	181.8263
Agua	3.0794 X 10 ⁴	0.2214	0.5741	12.4611	1.5850	12.5615
Surfynol 465	3.0794 X 10 ⁴	0.2214	0.5741	172.9898	22.0032	174.3835
Agua	2.9452 X 10 ⁴	0.2306	0.5533	11.9181	1.5912	12.0238
Surfynol 465	2.9452 X 10 ⁴	0.2306	0.5533	165.4509	22.0898	166.9190
Agua	2.8116 X 10 ⁴	0.2389	0.5337	11.3774	1.5900	11.4880
Surfynol 465	2.8116 X 10 ⁴	0.2389	0.5337	157.9458	22.0725	159.4806
Agua	2.6774 X 10 ⁴	0.2502	0.5140	10.8344	1.5912	10.9506
Surfynol 465	2.6774 X 10 ⁴	0.2502	0.5140	150.4069	22.0898	152.0161
Agua	2.5439 X 10 ⁴	0.2603	0.4875	10.2942	1.5825	10.4151
Surfynol 465	2.5439 X 10 ⁴	0.2603	0.4875	142.9073	21.9686	144.5860
Agua	2.4098 X 10 ⁴	0.2724	0.4831	9.7515	1.6411	9.8886
Surfynol 465	2.4098 X 10 ⁴	0.2724	0.4831	135.3741	22.7623	137.2777
Agua	2.3296 X 10 ⁴	0.2791	0.4489	9.4270	1.5625	9.5556
Surfynol 465	2.3296 X 10 ⁴	0.2791	0.4489	130.8687	21.6916	132.6542
Agua	2.2759 X 10 ⁴	0.2848	0.4641	9.2097	1.5563	9.3402
Surfynol 465	2.2759 X 10 ⁴	0.2848	0.4641	127.8520	21.6050	129.6646

4.1.5. Valores del % de Saturación en Términos del Número Total de Atrapamiento (Total Trapping Number).

Con los valores experimentales y teóricos del Número Total de Atrapamiento N_T y los datos obtenidos en el **Anexo 1.3.** Ecuaciones 42, 43 y 44 página 103 y los indicados en las **tablas** de la página 105, se construye la tabulación de dichos valores **ambos medios porosos**:

⊕ Tabla 4.9. Valores Experimentales.

Flujo GPM	N_T (x)	% de Saturación (y)
1.2	181.7890	0.2885
1.1	166.8848	0.2012
1.0	152.0161	0.1494
0.9	137.1785	0.1122
0.85	129.6646	0.1012

Tabla 4.10. Valores Teóricos.

Flujo GPM	$N_T(x)$	% de Saturación (y)
1.2	181.8263	0.2885
1.15	174.3835	0.2477
1.1	166.9190	0.2012
1.05	159.4806	0.1782
1.0	152.0161	0.1494
0.95	144.5860	0.1280
0.9	137.2777	0.1122
0.87	132.6542	0.1048
0.85	129.6646	0.1012

□

4.2. Resultados Experimentales y Teóricos para arena.

4.2.1. Valores del Gradiente de Presión (ΔP).

⊕ **Tabla 4.11. Valores Experimentales.**

No. de Corrida	Tiempo (minutos)	Flujo (GPM)	Valor Experimental promedio Gradiente de Presión (ΔP) PSI
1	0.6, 1.1, 3.5, 4.4, 6.1	1.2	10.0
2	0.1, 4.4, 6, 7.8	1.1	9.0
3	0.4, 1, 2.8, 3.1, 4.6	1.0	8.0
4	2.6, 3.2, 7.6, 8.1, 7.8	0.9	6.6
5	2.8, 5.6, 7.3, 8.9	0.85	6.2

Para los valores teóricos utilizamos:

densidad 61.6806 lb/ft^3 , viscosidad $6.4173135 \times 10^{-4} \text{ lb/ft-seg}$, diámetro partícula $2.37861 \times 10^{-3} \text{ ft}$

Tabla 4.12. Valores Teóricos.

No. de Corrida	Velocidad (ft/seg)	Valor Teórico Gradiente de Presión (ΔP) PSI
1	0.1265	10.33
2	0.1212	9.65
3	0.1160	9.00
4	0.1107	8.37
5	0.1054	7.76
6	0.1001	7.17
7	0.0948	6.60
8	0.0917	6.28
9	0.0896	6.06

Utilizando un área transversal de $1.6373 \times 10^{-4} \text{cm}^2$, se calcula:

4.2.2. Valores de K_H y K .

Tabla 4.13. Valores Experimentales.

Q (cm ³ /seg)	ΔP (psi) (cm H ₂ O)	K_H (cm/seg)	K (cm ²)
75.700	(10.0) (702.900)	6.5777×10^4	0.6481
69.390	(9.0) (632.610)	6.6993×10^4	0.6601
63.080	(8.0) (562.320)	6.8514×10^4	0.6751
56.775	(6.6) (463.914)	7.4746×10^4	0.7365
53.620	(6.2) (435.798)	7.5147×10^4	0.7404

Tabla 4.14. Valores Teóricos.

Q (cm ³ /seg)	ΔP (psi) (cm H ₂ O)	K_H (cm/seg)	K (cm ²)
75.700	(10.33) (726.0957)	6.3676×10^4	0.6274
72.551	(9.65) (678.2985)	6.5331×10^4	0.6437
69.390	(9.00) (632.6100)	6.6993×10^4	0.6601
66.242	(8.37) (558.3273)	6.8772×10^4	0.6776
63.080	(7.76) (545.4504)	7.0633×10^4	0.6960
59.934	(7.17) (503.9793)	7.2637×10^4	0.7157
56.775	(6.60) (463.9140)	7.4746×10^4	0.7365
54.886	(6.28) (441.4212)	7.5946×10^4	0.7483
53.620	(6.06) (425.9574)	7.6883×10^4	0.7575

4.2.3. Valores de K_{eff} y K_{FW} .

Tabla 4.15. Valores Experimentales.

q_{FW} (cm/seg)	ΔP (psi) (Kg _f /cm ²)	K_{eff} (cm ²)	K_{FW}
46.2346×10^4	(10.0) (0.7031)	0.5615	0.8664
42.3807×10^4	(9.0) (0.6328)	0.5641	0.8546
38.5268×10^4	(8.0) (0.5625)	0.5674	0.8405
34.6760×10^4	(6.6) (0.4640)	0.5999	0.8145
32.7490×10^4	(6.2) (0.4359)	0.5964	0.8055

Tabla 4.16. Valores Teóricos.

q_w (cm/seg)	ΔP (psi) (Kg./cm ²)	K_{eff} (cm ²)	K_{row}
46.2346 X 10 ⁴	(10.33) (0.7263)	0.5457	0.8698
44.3114 X 10 ⁴	(9.65) (0.6785)	0.5551	0.8623
42.3807 X 10 ⁴	(9.00) (0.6328)	0.5641	0.8546
40.4581 X 10 ⁴	(8.37) (0.5885)	0.5732	0.8459
38.5268 X 10 ⁴	(7.76) (0.5456)	0.5822	0.8365
36.6054 X 10 ⁴	(7.17) (0.5041)	0.5912	0.8260
34.6760 X 10 ⁴	(6.60) (0.4640)	0.5999	0.8145
33.5222 X 10 ⁴	(6.28) (0.4415)	0.6041	0.8073
32.7490 X 10 ⁴	(6.06) (0.4261)	0.6076	0.8021

4.2.4. Valores de N_{Ca} , N_B y N_T **Tabla 4.17. Valores Experimentales.**

Fluido Desplazante	q_w (cm/seg)	K (cm ²)	K_{row}	N_{Ca}	N_B	N_T
Agua	46.2346 X 10 ⁴	0.6481	0.8664	187.0934	7.0021	187.2244
Surfymol 465	46.2346 X 10 ⁴	0.6481	0.8664	2,597.2966	97.2055	2,599.1149
Agua	42.3807 X 10 ⁴	0.6601	0.8546	171.4982	7.0345	171.6424
Surfymol 465	42.3807 X 10 ⁴	0.6601	0.8546	2,380.7981	97.6556	2,382.8000
Agua	38.5268 X 10 ⁴	0.6751	0.8405	155.9029	7.0757	156.0634
Surfymol 465	38.5268 X 10 ⁴	0.6751	0.8405	2,164.2996	98.2269	2,166.5275
Agua	34.6760 X 10 ⁴	0.7365	0.8145	140.3203	7.4809	140.5195
Surfymol 465	34.6760 X 10 ⁴	0.7365	0.8145	1,947.9753	103.8533	1,950.7417
Agua	32.7490 X 10 ⁴	0.7404	0.8055	132.5224	7.4373	132.7309
Surfymol 465	32.7490 X 10 ⁴	0.7404	0.8055	1,839.7232	103.2474	1,842.6181

Tabla 4.18. Valores Teóricos.

Fluido Desplazante	q_{ov} (cm/seg)	K (cm²)	K_{row}	N_{Ca}	N_B	N_T
Agua	46.2346 X 10 ⁴	0.6274	0.8698	187.0934	6.8051	187.2171
Surfynol 465	46.2346 X 10 ⁴	0.6274	0.8698	2,597.2966	94.4703	2,599.0146
Agua	44.3114 X 10 ⁴	0.6437	0.8623	179.3110	6.9223	179.4446
Surfynol 465	44.3114 X 10 ⁴	0.6437	0.8623	2,489.2580	96.0976	2,491.1122
Agua	42.3807 X 10 ⁴	0.6601	0.8546	171.4982	7.0345	171.6424
Surfynol 465	42.3807 X 10 ⁴	0.6601	0.8546	2,380.7981	97.6556	2,382.8000
Agua	40.4581 X 10 ⁴	0.6776	0.8459	163.7181	7.1480	163.8741
Surfynol 465	40.4581 X 10 ⁴	0.6776	0.8459	2,272.7933	99.2310	2,274.9585
Agua	38.5268 X 10 ⁴	0.6960	0.8365	155.9029	7.2602	156.0718
Surfynol 465	38.5268 X 10 ⁴	0.6960	0.8365	2,164.2996	100.7891	2,166.6451
Agua	36.6054 X 10 ⁴	0.7157	0.8260	148.1279	7.3725	148.3112
Surfynol 465	36.6054 X 10 ⁴	0.7157	0.8260	2,056.3622	102.3471	2,058.9076
Agua	34.6760 X 10 ⁴	0.7365	0.8145	140.3203	7.4809	140.5195
Surfynol 465	34.6760 X 10 ⁴	0.7365	0.8145	1,947.9753	103.8533	1,950.7417
Agua	33.5222 X 10 ⁴	0.7483	0.8073	135.6513	7.5333	135.8603
Surfynol 465	33.5222 X 10 ⁴	0.7483	0.8073	1,883.1589	104.5804	1,886.0606
Agua	32.7490 X 10 ⁴	0.7575	0.8021	132.5224	7.5770	132.7388
Surfynol 465	32.7490 X 10 ⁴	0.7575	0.8021	1,839.7232	105.1863	1,842.7277

4.2.5. Valores del % de Saturación en Términos del Número Total de Atrapamiento (Total Trapping Number).

Tabla 4.19. Valores Experimentales.

Flujo GPM	N_T (x)	% de Saturación (y)
1.2	2,599.1149	0.3792
1.1	2,382.8000	0.0760
1.0	2,166.5275	0.0355
0.9	1,950.7417	0.0216
0.85	1,842.6181	0.0107

Tabla 4.20. Valores Teóricos.

Flujo GPM	N_T (x)	% de Saturación (y)
1.2	2,599.0146	0.3792
1.15	2,491.1122	0.2279
1.1	2,382.8000	0.0760
1.05	2,274.9585	0.0471
1.0	2,166.6451	0.0355
0.95	2,058.9076	0.0299
0.9	1,950.7417	0.0216
0.87	1,886.0606	0.0154
0.85	1,842.7277	0.0107

CAPÍTULO 5.

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

5.1. Diferencias entre los medios porosos utilizados en la experimentación

Gradiente de presión (ΔP)

El gradiente de presión experimental y teórico (Tablas 4.1 y 4.2, página 56) de las esferas de vidrio **es menor** que el de la arena (Tablas 4.11 y 4.12, página 60), debido a la superficie lisa y compactación existente en las esferas, eso permite que el flujo circule más fácilmente debido a la menor permeabilidad intrínseca (K), la cual es en sí una resistencia viscosa.

De las tablas anteriormente mencionadas, obtenemos el % de error para ambos medios porosos:

$$\% \text{ error} = \frac{\text{valor teórico} - \text{valor promedio experimental}}{\text{valor teórico}} \times 100 \quad (41)$$

Tabla 5.1. % de error

Flujo (cm ³ /seg)	% error (esferas de vidrio)	% error (arena)
75.7	2.36	3.19
69.4	2.23	0
63.1	0	3.09
56.8	3.22	0
53.6	0	2.31

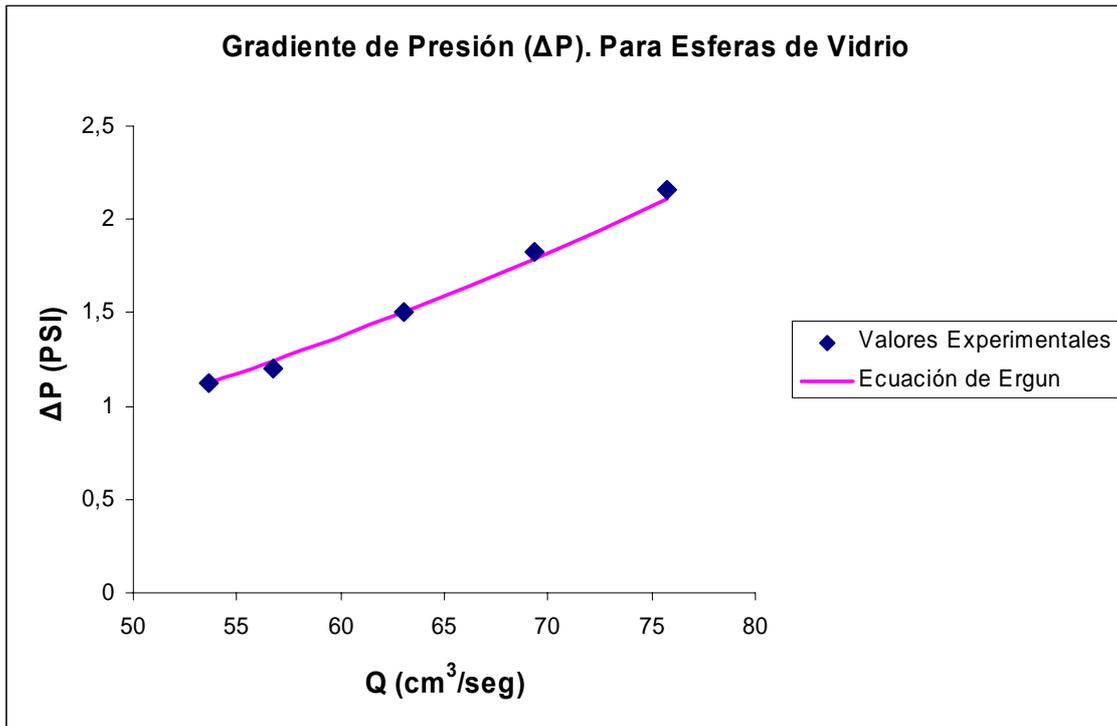


Figura 5.1. Variación del gradiente de presión (ΔP) en el medio poroso de esferas de vidrio, con respecto al flujo de agua para las pruebas de saturación

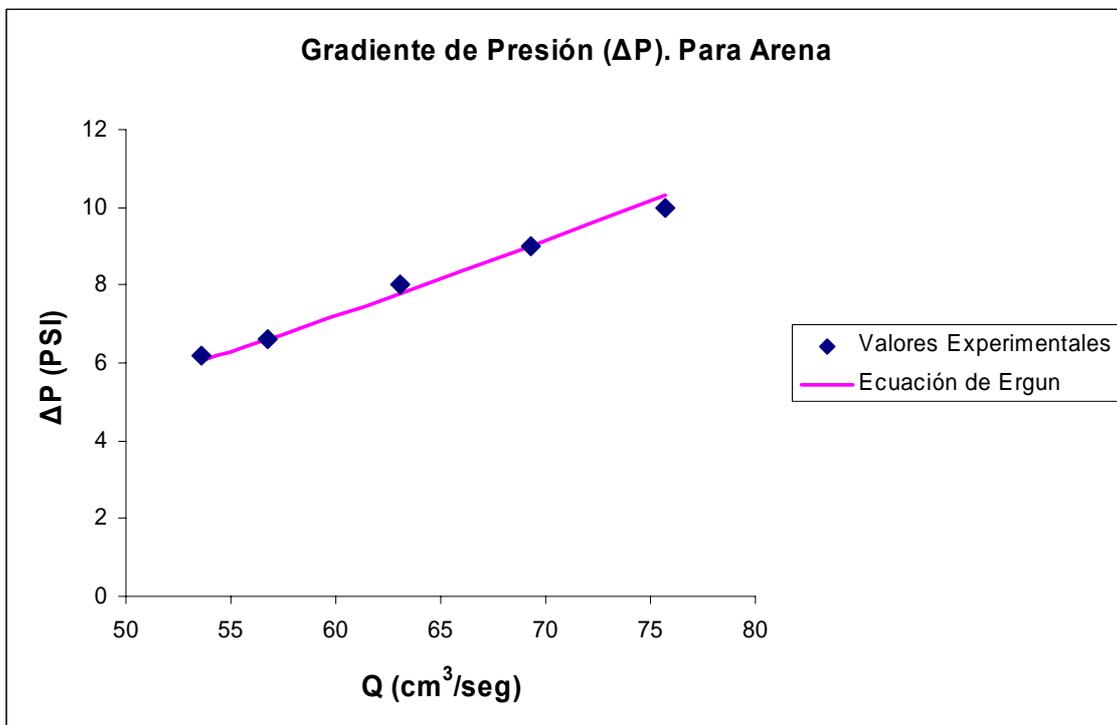


Figura 5.2. Variación del gradiente de presión (ΔP) en el medio poroso de arena, con respecto al flujo de agua para las pruebas de saturación

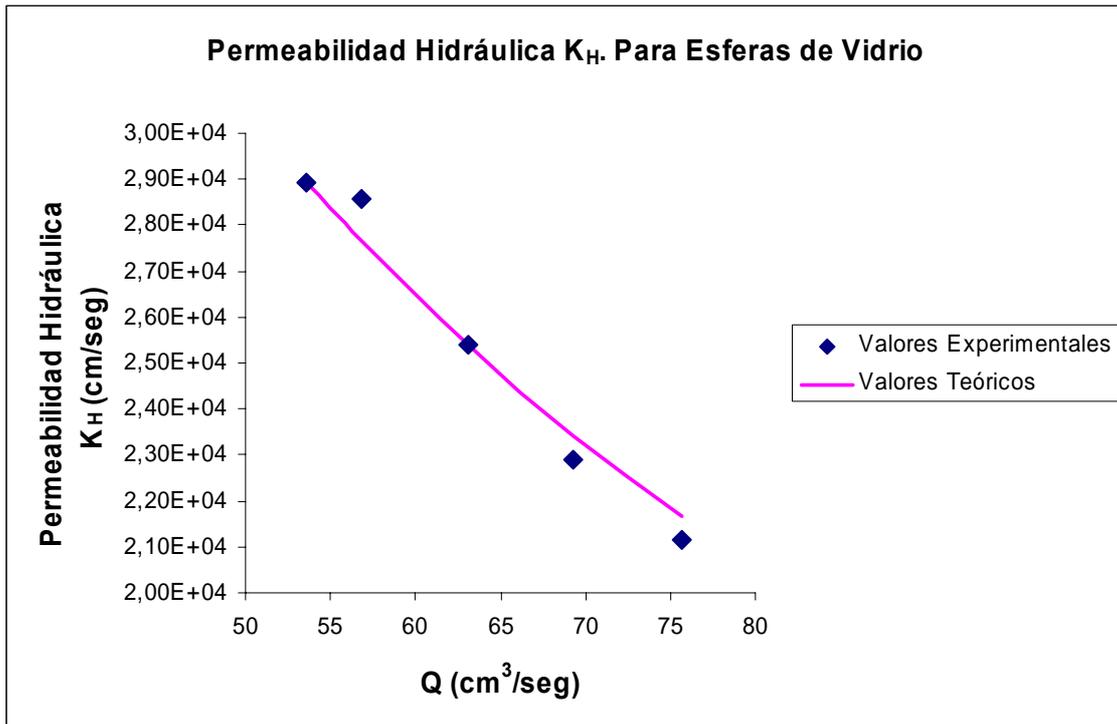


Figura 5.3. Variación de la Permeabilidad Hidráulica K_H en el medio poroso de esferas de vidrio, con respecto al flujo de agua para las pruebas de saturación

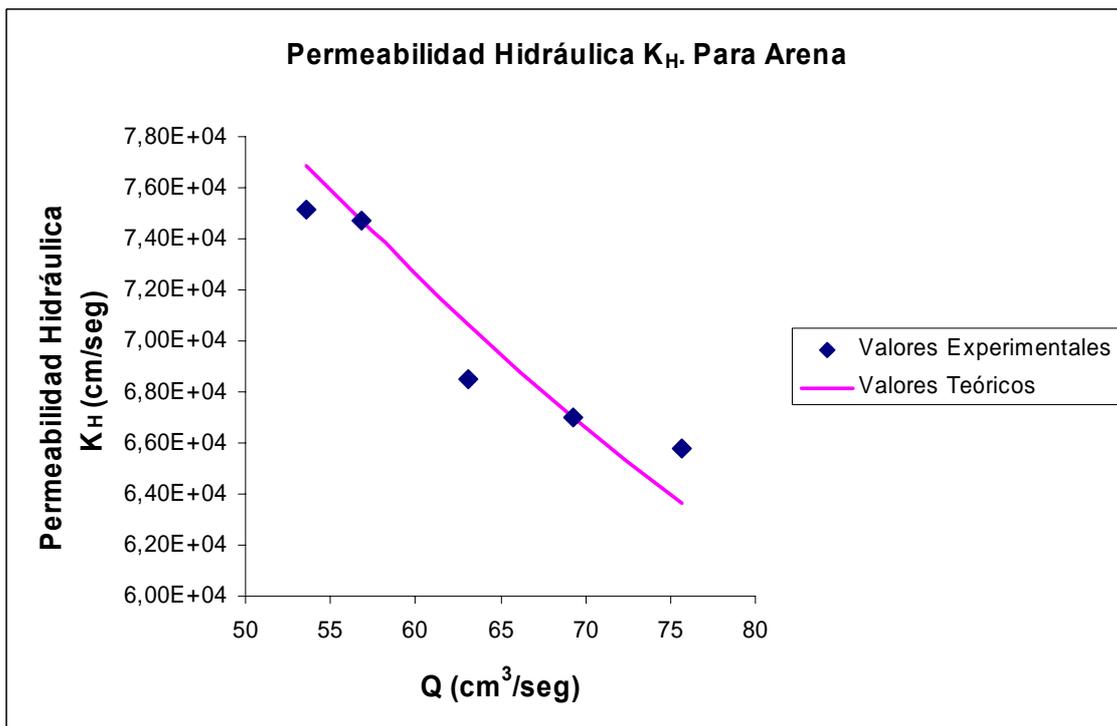


Figura 5.4. Variación de la Permeabilidad Hidráulica K_H en el medio poroso de arena, con respecto al flujo de agua para las pruebas de saturación

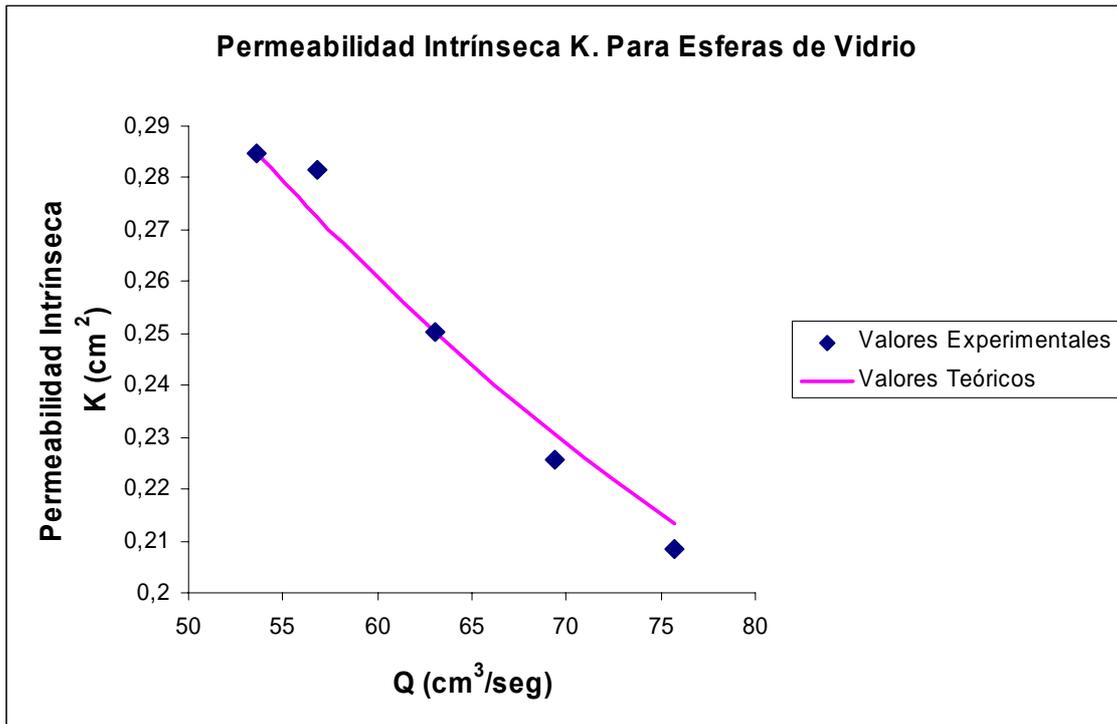


Figura 5.5. Variación de la Permeabilidad Intrínseca K en el medio poroso de esferas de vidrio, con respecto al flujo de agua para las pruebas de saturación

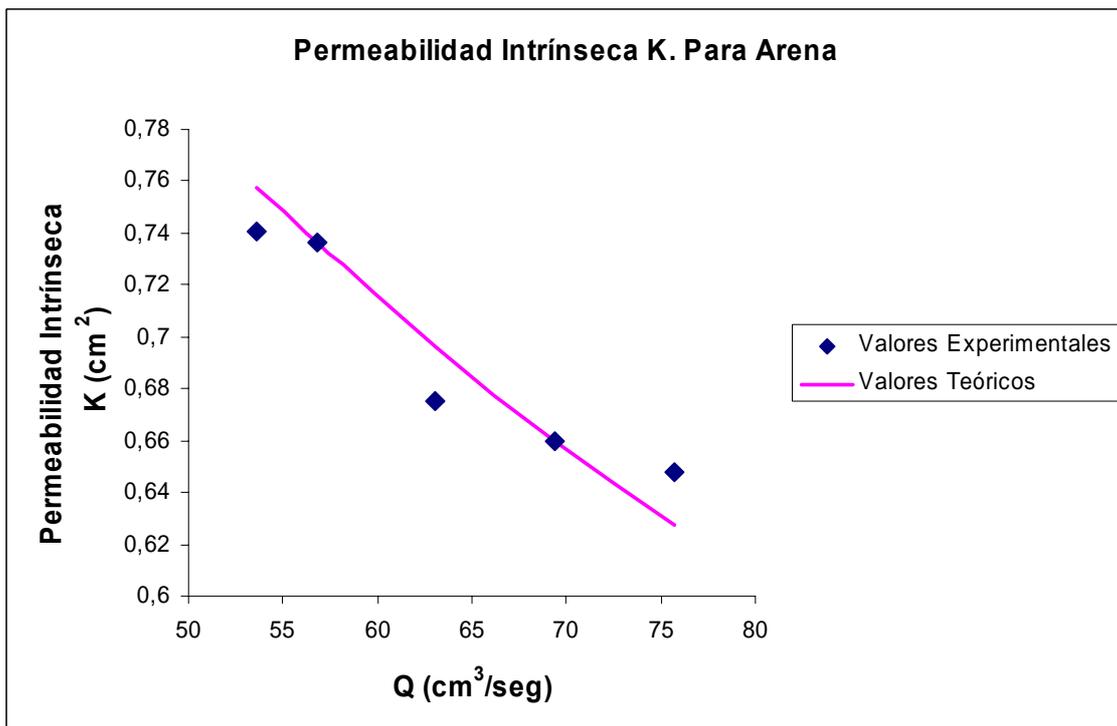


Figura 5.6. Variación de la Permeabilidad Intrínseca K en el medio poroso de arena, con respecto al flujo de agua para las pruebas de saturación

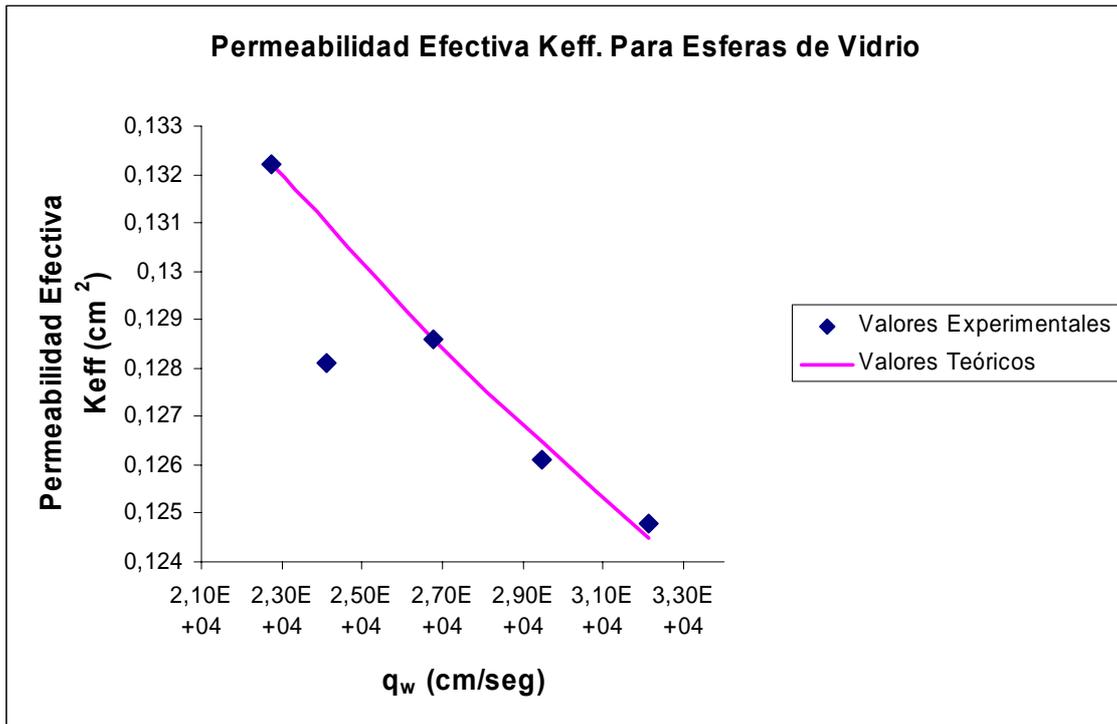


Figura 5.7. Variación de la Permeabilidad Efectiva K_{eff} en el medio poroso de esferas de vidrio, con respecto al flujo de agua para las pruebas de saturación

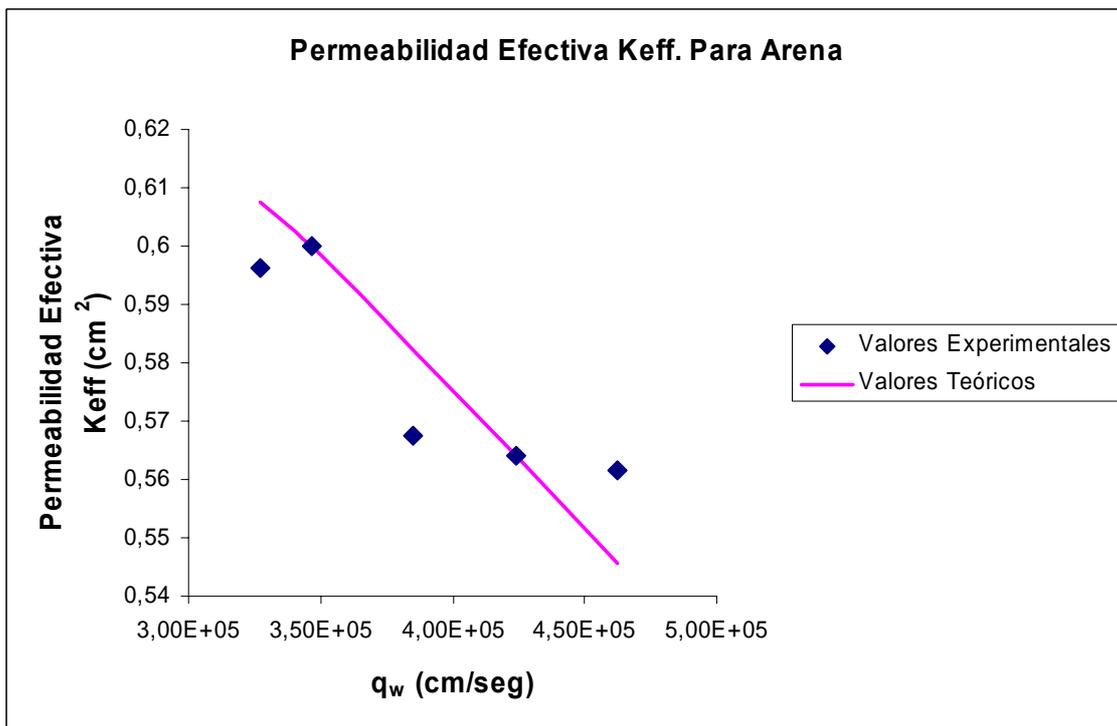


Figura 5.8. Variación de la Permeabilidad Efectiva K_{eff} en el medio poroso de arena, con respecto al flujo de agua para las pruebas de saturación

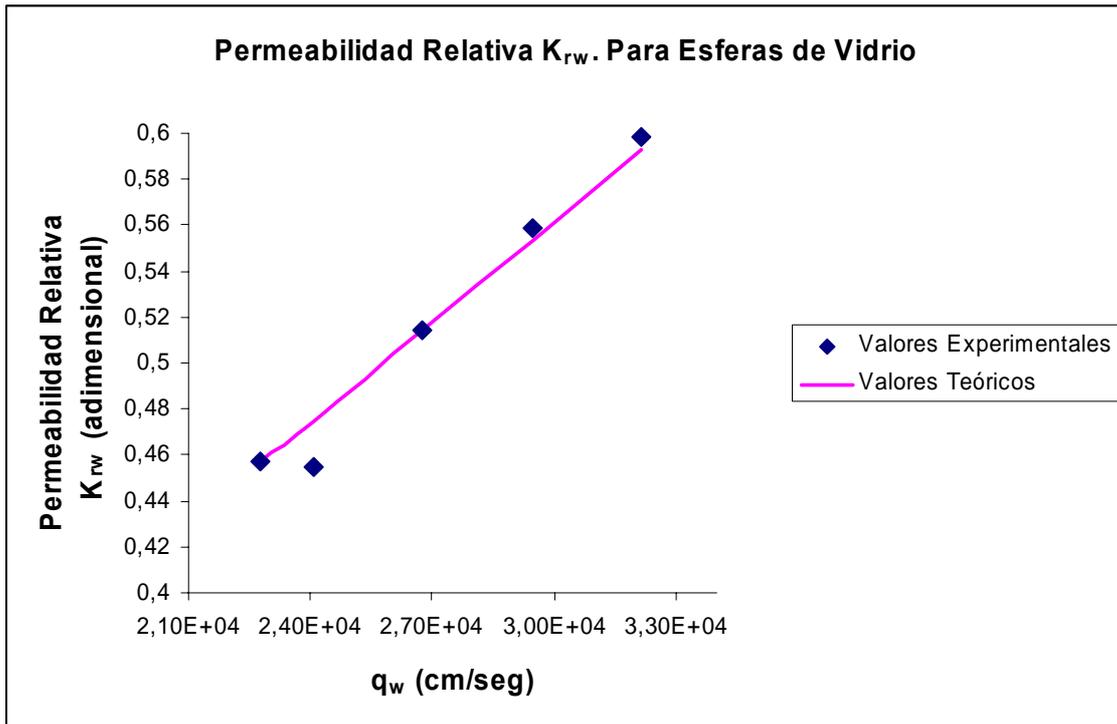


Figura 5.9. Variación de la Permeabilidad Relativa K_{rw} en el medio poroso de esferas de vidrio, con respecto al flujo de agua para las pruebas de saturación

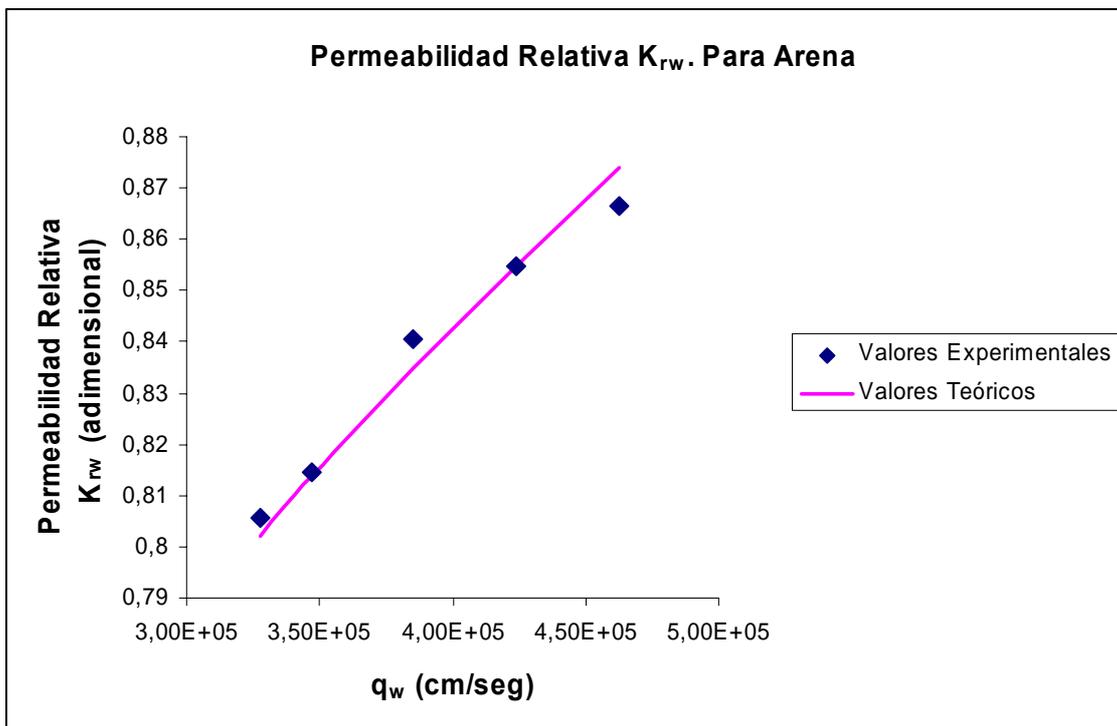


Figura 5.10. Variación de la Permeabilidad Relativa K_{rw} en el medio poroso de arena, con respecto al flujo de agua para las pruebas de saturación

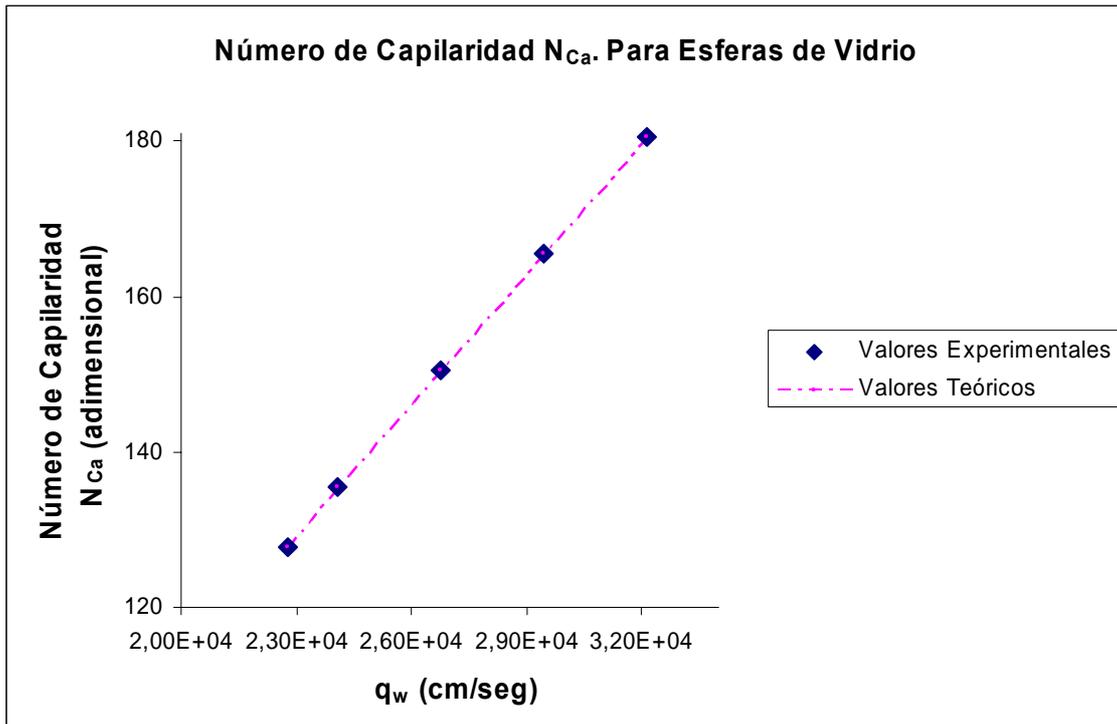


Figura 5.11. Variación del número de capilaridad en el medio poroso de esferas de vidrio, con respecto al flujo de solución de surfactante.

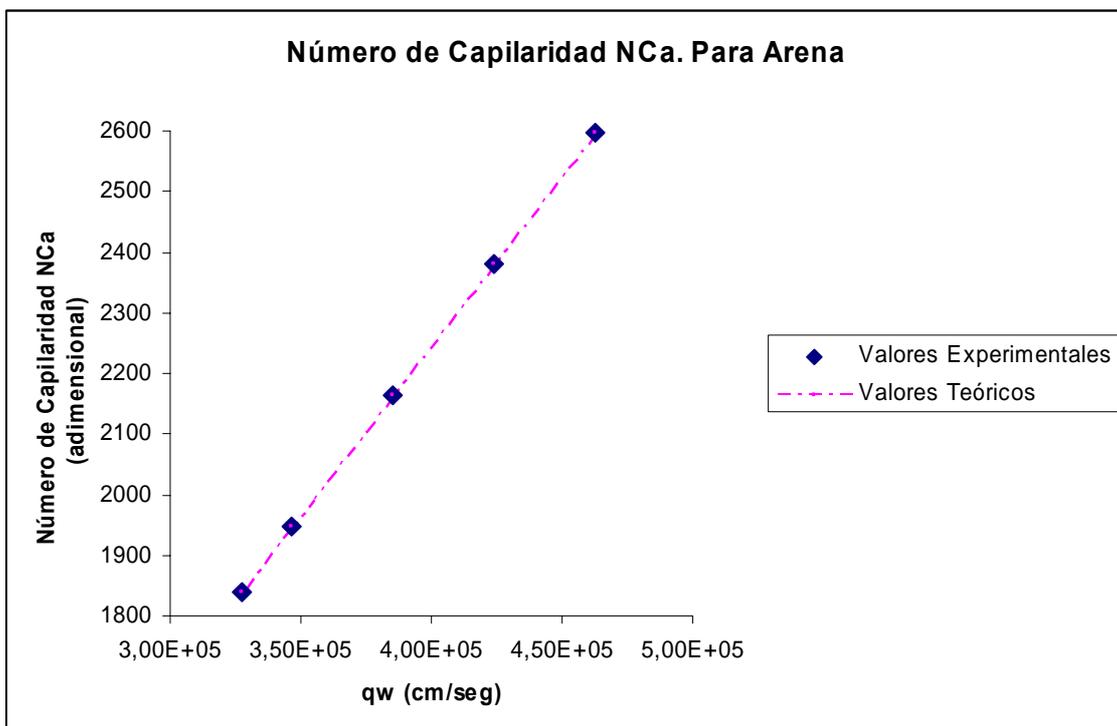


Figura 5.12. Variación del número de capilaridad en el medio poroso de arena, con respecto al flujo de solución de surfactante.

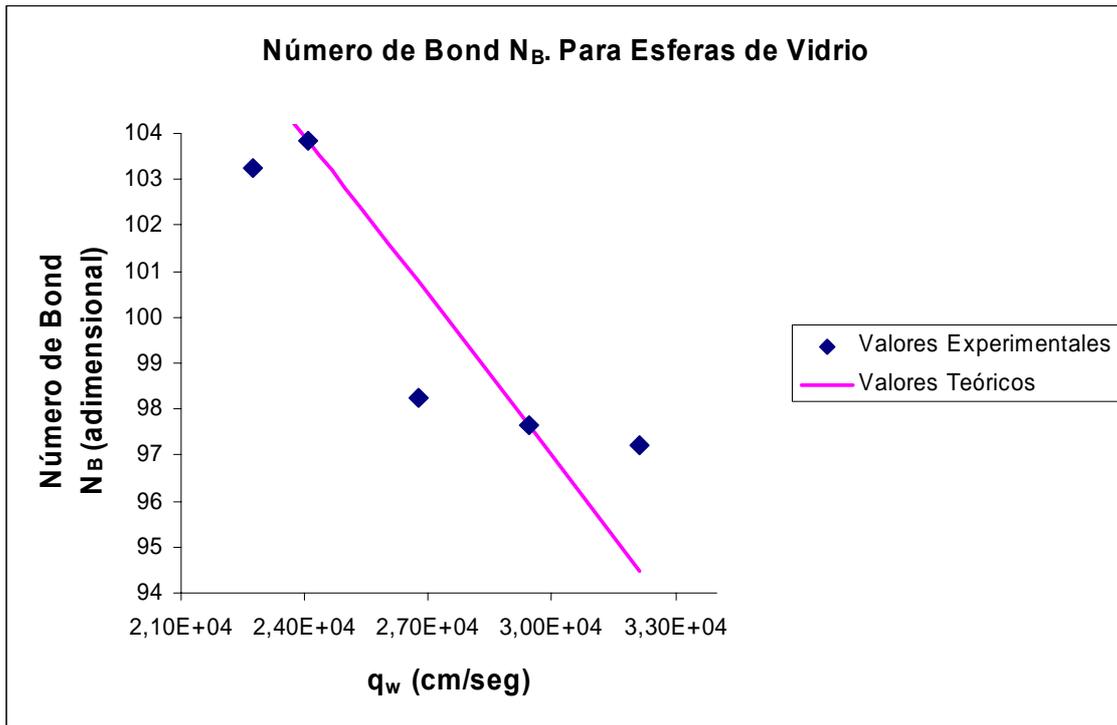


Figura 5.13. Variación del número de bond en el medio poroso de esferas de vidrio, con respecto al flujo de solución de surfactante.

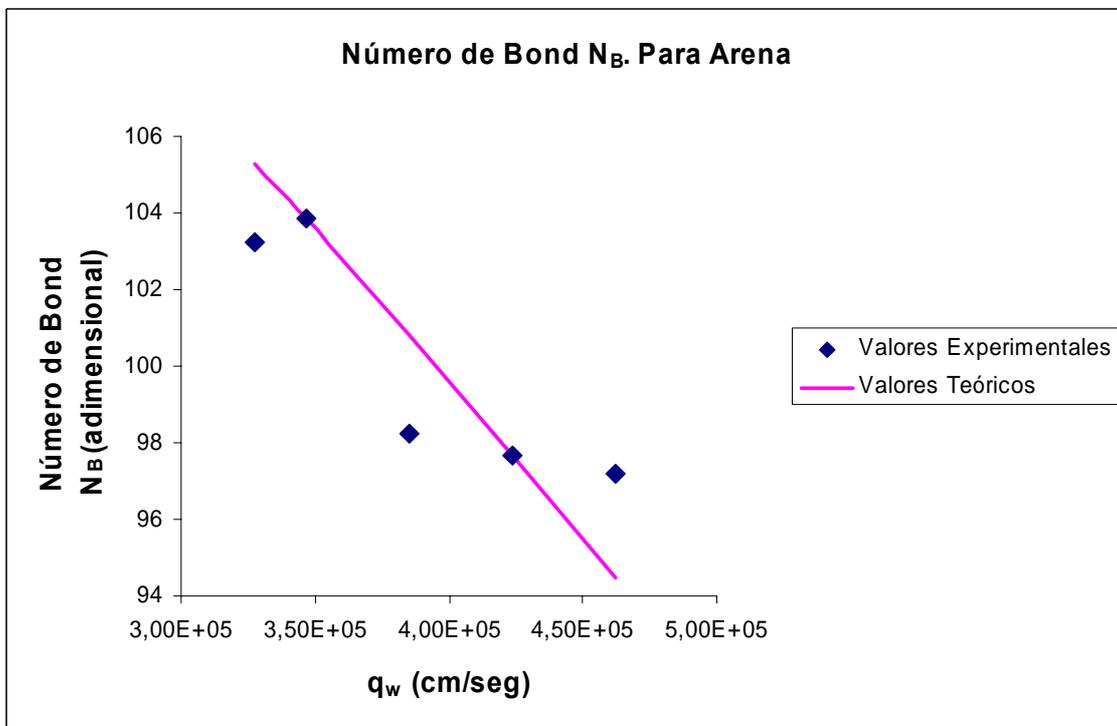


Figura 5.14. Variación del número de bond en el medio poroso de arena, con respecto al flujo de solución de surfactante.

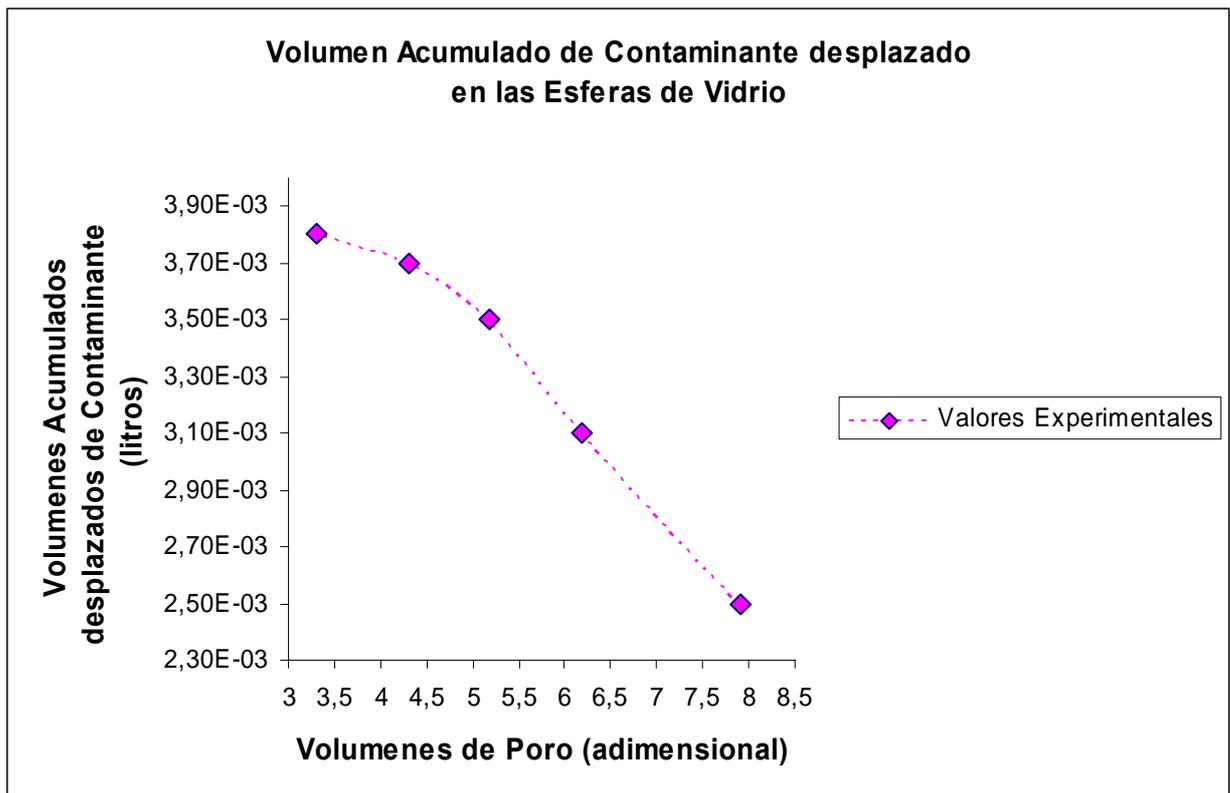


Figura 5.15. Volumen acumulado de contaminante desplazado en las esferas de vidrio después del lavado con el surfactante gemelo Surfynol 465.

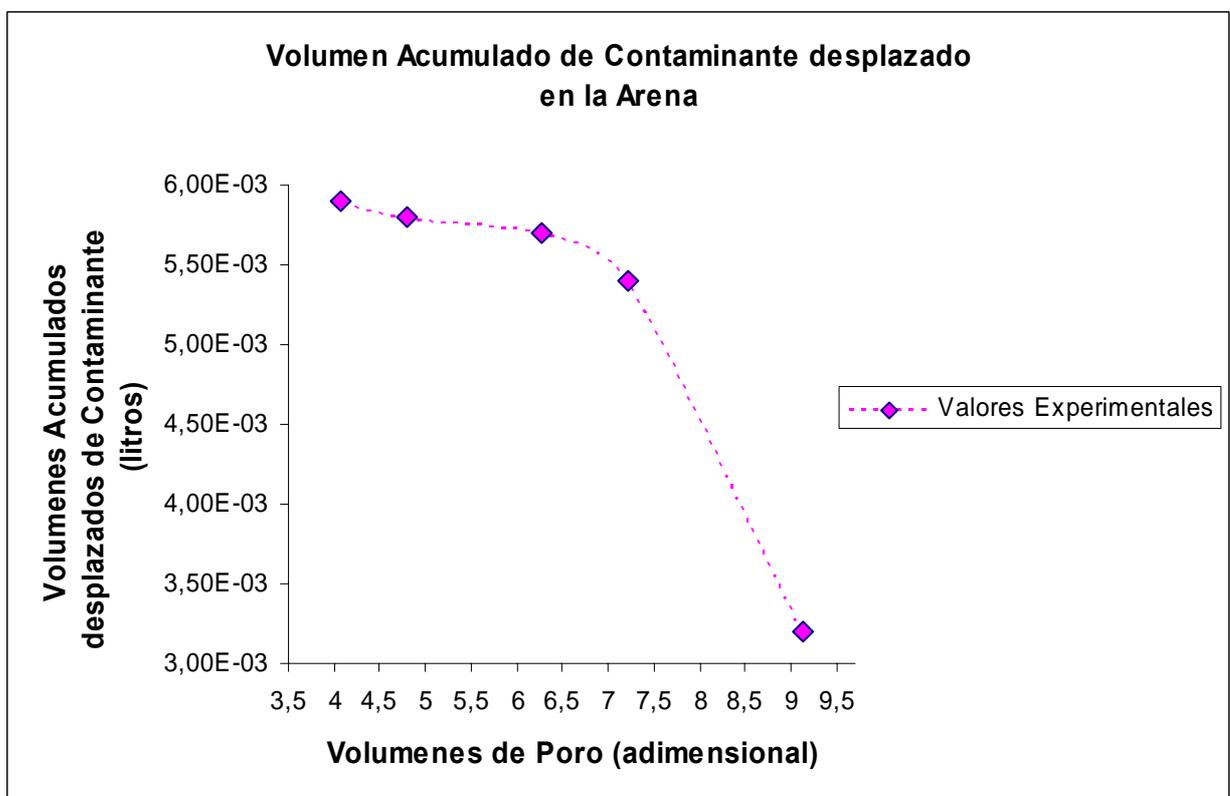


Figura 5.16. Volumen acumulado de contaminante desplazado en la arena después del lavado con el surfactante gemelo Surfynol 465.

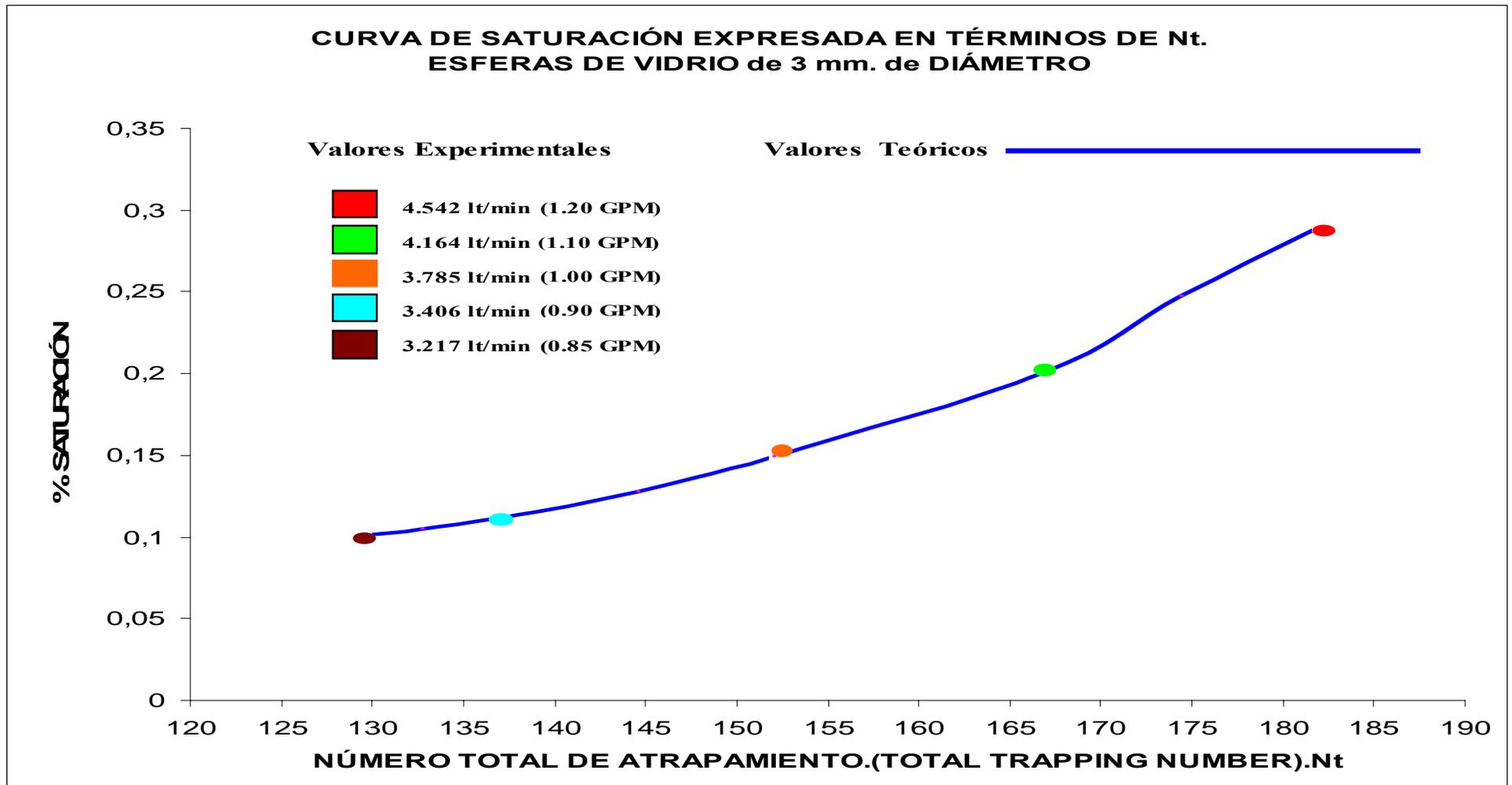


Figura 5.17. % de Saturación Experimental y Teórico, expresado en Términos del Número Total de Atrapamiento Nt (Total Trapping Number). Para esferas de vidrio.

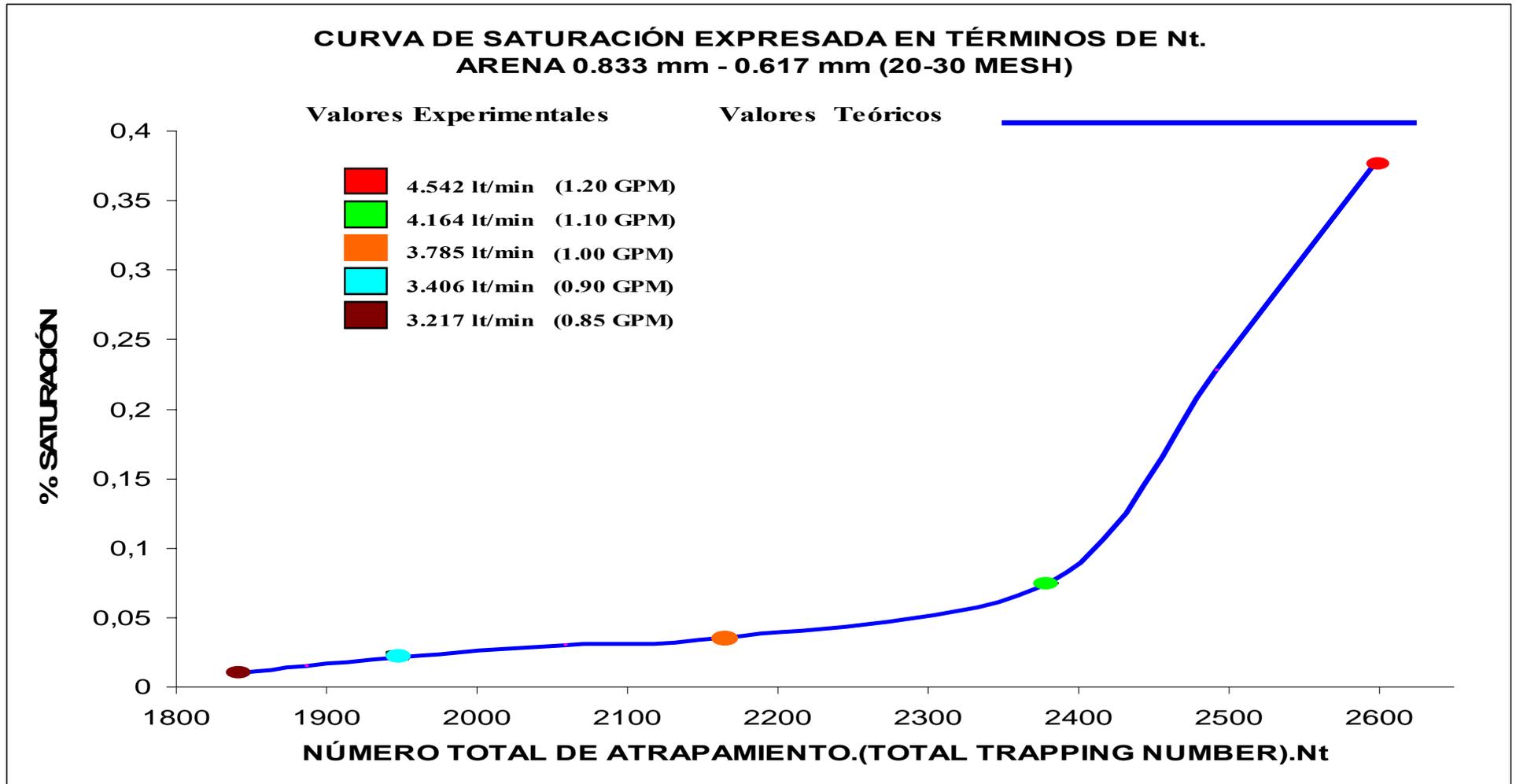


Figura 5.18. % de Saturación Experimental y Teórico expresado en Términos del Número Total de Atrapamiento Nt (Total Trapping Number). Para arena.

5.2. Comparación de los resultados de la experimentación con los obtenidos por el Dr. Kurt Pennell et al.⁴⁵

Ahora procederemos a efectuar el análisis comparativo de los valores obtenidos por el Dr. Kurt Pennell et al.⁴⁵ y los del presente trabajo **considerando solamente los valores de la arena** que es la misma que utilizó el Dr. Pennell en su estudio, con relación al tipo de variables consideradas por él, son las mismas que tomamos para este trabajo:

Referente a las condiciones de operación se varió lo siguiente a lo utilizado en el estudio en comparación: en el presente trabajo se consideró un caudal mayor, así como diferente contaminante, equipo de acero inoxidable, un surfactante gemelo, bomba de émbolo, esto se puede observar en la Tabla 5.2.

Tabla 5.2. Diferencias de operación entre el Dr. Kurt D. Pennell y el presente trabajo.

Condiciones de Operación	Dr. Kurt D. Pennell	Presente Trabajo
Caudal considerado	Flujo volumétrico bajo	Flujo volumétrico alto
Contaminante considerado	Tetracloruro de etileno (PCE)	Antraceno en ortodichlorobenceno
Equipo	Columnas de vidrio	Tubo metálico acero inoxidable
	Bomba dosificadora	Bomba de embolo
Surfactante	4% Witconol 2722	70 gr/L Surfynol 465 (gemelo)
	4% 4:1 Aerosol MA/OT	
	4% 1:1 Aerosol AY/OT	

Procederemos a efectuar la comparación de las velocidades utilizadas en este trabajo y las usadas por el Dr. Kurt D. Pennell (Tabla 5.3), observamos que las velocidades de darcy utilizadas en este trabajo son mayores que las usadas en el estudio en comparación, tomándose la velocidad más alta y la más baja en dicha comparación..

Tabla 5.3. Diferencias entre las velocidades de darcy usadas por el Dr. Kurt D. Pennell y las utilizadas en el presente trabajo.

Surfactante Estudio	q_w (cm/Hr)	Surfactante Trabajo	q_w (cm/Hr)
4% Witconol 2722	14.40	70 gr/L Surfynol 465 (gemelo)	11.78×10^8
	86.40		16.64×10^8
4% 4:1 Aerosol MA/OT	20.88	70 gr/L Surfynol 465 (gemelo)	11.78×10^8
	62.64		16.64×10^8
4% 1:1 Aerosol AY/OT	16.34	70 gr/L Surfynol 465 (gemelo)	11.78×10^8
	19.06		16.64×10^8

Como podemos observar en la Tabla 5.4, las permeabilidades intrínsecas son muy cercanas, demostrando que la arena se comporta de manera similar en lo referente a su resistencia viscosa (K), a caudales grandes es un poco mayor que a caudales pequeños.

Tabla 5.4. Diferencias entre los valores obtenidos de la permeabilidad intrínseca por el Dr. Kurt D. Pennell y los del presente trabajo.

Surfactante Estudio	K(cm^2)	Surfactante Trabajo	K(cm^2)
4% Witconol 2722	0.43	70 gr/L Surfynol 465 (gemelo)	0.7576
	0.43		0.6275
4% 4:1 Aerosol MA/OT	0.43	70 gr/L Surfynol 465 (gemelo)	0.7576
	0.43		0.6275
4% 1:1 Aerosol AY/OT	0.43	70 gr/L Surfynol 465 (gemelo)	0.7576
	0.43		0.6275

En la Tabla 5.5, se efectúa la comparación de los valores de la permeabilidad relativa de la solución acuosa, encontrados en el estudio y los obtenidos en el presente trabajo, observándose que a flujos mayores el valor de esta permeabilidad es menor y a flujos pequeños su valor aumenta.

Tabla 5.5. Diferencias entre los valores obtenidos de la permeabilidad relativa por el Dr. Kurt D. Pennell y los del presente trabajo.

Surfactante Estudio	K_{rw}	Surfactante Trabajo	K_{rw}
4% Witconol 2722	0.15	70 gr/L Surfynol 465 (gemelo)	0.05572
	0.35		0.06046
4% 4:1 Aerosol MA/OT	0.18	70 gr/L Surfynol 465 (gemelo)	0.05572
	0.23		0.06046
4% 1:1 Aerosol AY/OT	0.28	70 gr/L Surfynol 465 (gemelo)	0.05572
	0.32		0.06046

En el caso del Número de Capilaridad N_{Ca} , en la Tabla 5.6, se observa que a flujos menores utilizados por el Dr. Kurt D. Pennell, obtuvo valores pequeños del número de capilaridad, en comparación con los valores encontrados en el presente trabajo, que se demuestra que a flujos mayores dicho número aumenta en valor numérico, ya que es directamente proporcional a la velocidad de darcy.

Tabla 5.6. Diferencias entre los valores obtenidos del número de capilaridad N_{Ca} por el Dr. Kurt D. Pennell y los del presente trabajo.

Surfactante Estudio	N_{Ca}	Surfactante Trabajo	N_{Ca}
4% Witconol 2722	1.0×10^{-5}	70 gr/L Surfynol 465 (gemelo)	1,839
	6.0×10^{-5}		2,597
4% 4:1 Aerosol MA/OT	1.3×10^{-4}	70 gr/L Surfynol 465 (gemelo)	1,839
	3.9×10^{-4}		2,597
4% 1:1 Aerosol AY/OT	6.0×10^{-4}	70 gr/L Surfynol 465 (gemelo)	1,839
	7.0×10^{-4}		2,597

Ahora incursionaremos en el análisis del número de bond N_B , que representa *las fuerzas de flotación* y es muy importante para definir la influencia que tiene en el cálculo del número total de atrapamiento N_t , en la Tabla 5.7, se observa que si bien los valores de éste número son pequeños en comparación con los del trabajo elaborado, son muy cercanos a los valores encontrados del número de capilaridad por el Dr. Kurt D. Pennell (ver Tabla 5.8), no así en el presente trabajo que definitivamente son demasiado pequeños en comparación con los de capilaridad, como se explicó en las páginas 74 y 76 y no tienen ingerencia en el número total de atrapamiento N_t .

Tabla 5.7. Diferencias entre los valores obtenidos del número de bond N_B por el Dr. Kurt D. Pennell y los del presente trabajo.

Surfactante Estudio	N_B	Surfactante Trabajo	N_B
4% Witconol 2722	7.0×10^{-6}	70 gr/L Surfynol 465 (gemelo)	7.3073
	1.6×10^{-5}		6.5681
4% 4:1 Aerosol MA/OT	7.0×10^{-5}	70 gr/L Surfynol 465 (gemelo)	7.3073
	9.0×10^{-5}		6.5681
4% 1:1 Aerosol AY/OT	7.0×10^{-4}	70 gr/L Surfynol 465 (gemelo)	7.3073
	8.0×10^{-4}		6.5681

En la Tabla 5.8, se observa que a flujos menores utilizados por el Dr. Kurt D. Pennell, el número total de atrapamiento N_t es pequeño, en comparación al encontrado en el presente trabajo, a mayor caudal (velocidad de darcy grande), mayor el valor de dicho número, como se mencionó anteriormente este número es **directamente proporcional al número de capilaridad N_{Ca} (fuerzas de viscosidad y capilaridad)**, ya que el **número de bond N_B (fuerzas de flotación y capilares)** se desprecia, siempre y cuando se manejen caudales grandes, no así cuando el flujo es pequeño, ya que depende tanto del número de bond N_B (fuerzas de flotación y capilares), como del número de capilaridad N_{Ca} (fuerzas de viscosidad y capilaridad).

En el estudio del Dr. Kurt D. Pennell, se indica que para iniciar la movilización del contaminante (PCE) se tiene un valor de 2×10^{-5} a 5×10^{-5} , mientras que en el trabajo presentado se observa que en un Número Total de Atrapamiento de 1,950 se inicia la movilización, en dicho estudio se menciona que a un N_t de 1×10^{-3} se presenta la movilización total y en este trabajo se observa que es en un N_t de 2,350 (ver Figura 5.18 página 75).

Tabla 5.8. Diferencias entre los valores obtenidos del número total de atrapamiento N_t (Total Trapping Number) por el Dr. Kurt D. Pennell y los del presente trabajo.

Surfactante Estudio	N_t	Surfactante Trabajo	N_t
4% Witconol 2722	1.22×10^{-5}	70 gr/L Surfynol 465 (gemelo)	1,839
	6.21×10^{-5}		2,597
4% 4:1 Aerosol MA/OT	1.48×10^{-4}	70 gr/L Surfynol 465 (gemelo)	1,839
	1.26×10^{-4}		2,597
4% 1:1 Aerosol AY/OT	9.21×10^{-4}	70 gr/L Surfynol 465 (gemelo)	1,839
	1.06×10^{-3}		2,597

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones.

A velocidades grandes, el Número de Bond (N_B) es despreciable, quedando el Número Total de Atrapamiento (N_t) (Total Trapping Number) en función directa del Número de Capilaridad (N_{Ca}). Observamos que los **valores obtenidos Experimentalmente** para el Número Total de Atrapamiento (N_t), difieren en milésimas y centésimas y en pocas ocasiones en décimas de los **valores Teóricos calculados** a través de la ecuación de Ergun. **Prácticamente** como se puede observar en las Gráficas No. 4 y 5, el **valor Experimental es igual al valor Teórico**. Para utilizar la Ecuación de Ergun fue necesario calcular el Número de Reynolds ⁶³ correspondiente, por lo que se comprueba que en nuestro caso a **flujo de transición**, para la Arena, el Reynolds calculado va de 20 a 29 y a **flujo de transición** (tres valores) y **flujo turbulento** (dos valores) para las Esferas de Vidrio, el Reynolds calculado va de 85 a 120, por lo tanto la **Ecuación de Ergun es adecuada para efectuar el cálculo del Gradiente de Presión (ΔP) Teórico**, ya que maneja tanto flujo laminar como flujo turbulento.

La aplicación del Surfactante Gemelo no iónico Surfynol 465 en una Concentración de 70 gr/L, en suelos contaminados con hidrocarburos, mostró tener propiedades adecuadas para la movilización de los mismos, obteniéndose un 98.7 % de eficiencia en la Arena y un 95 % en las Esferas de Vidrio.

El bajo valor de la CMC (Concentración Micelar Crítica), (Ver Anexo 1.4), de este surfactante, logra movilizaciones aceptables.

Se indujo la movilización debido a la disminución en la Tensión Interfacial (σ) de 23.6 a 1.7 dinas/cm entre la concentración residual uniforme del contaminante y la fase acuosa.

Las Curvas de Saturación son útiles para evaluar la movilización del contaminante durante el flujo del surfactante gemelo Surfynol 465 a través del medio poroso.

Comparando los resultados de este experimento con los del Dr. Pennell ⁴⁵, encontramos que para la Arena que el utilizó, los valores que indica con velocidades de Darcy bajas (1.66 a 16,6 cm/hr) se comportan de manera similar con los valores obtenidos en este experimento, con velocidades altas (3.7×10^9 a 5.3×10^9 cm/hr). Concluimos lo mismo que el Dr. Pennell ⁴⁵, que la diferencia en las Permeabilidades de la Arena y las de las Esferas de Vidrio se reflejaron en el N_T , dando

mayor en la Arena, así como que esta estrategia de recuperación de contaminante puede ser más eficiente y económica que la Solubilización Micelar sola, proveyendo que el contaminante puede ser rápidamente extraído.

Con relación al cromatograma del Antraceno página 96, los picos que aparecen en los tiempos de retención de 2.4 minutos, 10 minutos y 13.6 minutos, pertenecen a los compuestos de las impurezas en el antraceno, ya que se utilizó antraceno al 96%.

Recomendaciones

Es conveniente probar con otros surfactantes gemelos no iónicos, para ver el comportamiento de movilización a flujos con velocidades de Darcy más bajos y obtener los Números Totales de Atrapamiento (N_T) y también compararlos, tanto experimentalmente como teóricamente, utilizando la Ecuación de Ergun, verificando que se tengan valores de flujo laminar, transición y turbulento, para utilizar dicha ecuación.

Se recomienda utilizar columnas empacadas con diferentes medios porosos tanto verticales como horizontales, utilizando el procedimiento del Dr. Kurt Pennell,⁴⁶ con surfactantes gemelos y comprobando que las fuerzas de flotación y gravitacionales tienen impacto en la movilización de los NAPL.

Se recomienda que en el Laboratorio se lleve a cabo un estudio que considere la recuperación del surfactantes utilizado en este trabajo, para que sea reutilizado, y de esa investigación aumentar eficiencia y costo total de surfactante gemelo utilizado.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] **Abdul A. S., Gibson T. L., Ang C. C., Smith J. C. Y Sobczynsky R. E. (1992).** "In Situ surfactant washing of polychlorinated biphenyls and oils from contaminated site" *Ground Water*, vol. 30, No.2, pp. 219-231.
- [2] **Altamirano L. E. (1999).** "Tensión Superficial". SEINET-Facultad de Química. UNAM.
<http://redquimica.pquim.unam.mx/academico/fs/fs.htm>. pp. 1-11
- [3] **Ang C. C. y Abdul A. S. (1983),** "Aqueous Surfactant Washing of Residual Oil Contamination from Sandy Soil" *GWMR. USA*. pp. 121-127.
- [4] **Boris N. Aronstein., Martin Alexander.(1992).**"Effect of a non-ionic surfactant added to the soil surface on the biodegradation of aromatic hydrocarbons within the soil". *Applied and Microbiology Biotechnology*. Vol. 39. pp. 386-390.
- [5] **Bhandari A., Novak J. Y Dove D. (2000).** "Effect of soil washing on petroleum hydrocarbon distribution on sand surfaces". *Journal of Hazardous Substance Research*. Vol 2, No. 7, Kansas State University. pp. 1-10.
- [6] **B. Vigon y A. Rubin. (1989).** "Practical Considerations in the Surfactants aided mobilization of Contaminants in Aquifers". *Journal WPCF*, VOL. 61 PP. 43-49.
- [7] **Calabrese E. J. Y Kostecki P. T. (1991)** "Hydrocarbon contaminated soils". Lewis Publishers Inc., Vol. 1, USA. pp. 149-164, 167-178.
- [8] **Cepeda D. J. M. (1991).** "Química de Suelos". Editorial Trillas, México. pp. 11 - 57
- [9] **Chiou, C. T. Porter P. E. y Schmedding D. W. (1989).** "Partition equilibria of non-ionic organic compounds between soil organic matter and water". *Environmental Science Technology*. Vol. 17, No. 4. pp 227-231.
- [10] **Chris L. Brown and Gary A. Pope.(1994).**" Simulation of surfactant-enhanced aquifer remediation". *Water Resources Research*. Vol.30 No.11, pp. 2959-2977.
- [11] **Cohen R. M., Mercer J. W. Y Mathews J. (1993).** "DNAPL Site Evaluation". CRC Press, C.K. Smoley, USA.
- [12] **Cole G. M. (1994).** "Assessment and Remediation of Petroleum Contaminated Sites". CRC Press, USA. pp. 19-23, 76-88, 173, 222-252.
- [13] **Curtis G. P., Roberts P. V. y Reinhard m. (1986).** "A natural gradient experiment on solute transport in a sand aquifer". *Sorption of organic solutes and its influence on mobility*. *Water Resources Research*. Vol. 22, No. 13. pp. 2059-2067.
- [14] **David J. Wilson; Ann N. Clarke.(1991).**"Soil Clean Up by in-situ Surfactant Flushing. IV. A Two-Component Mathematical Models.". *Separation Science and Technology*. Vol.26, pp. 1177-1994.

- [15] **Deshpande S, Shiau B. y Sabatini. (1999).** “Surfactant Selection for enhancing ex situ soil washing”. Water Research, Vol. 33, No. 2, Elsevier Science Ltd. Great Britain.
- [16] **Domínguez R. y Aguilera H. N. (1990)** “Metodología de Análisis físico-químicos de suelos. Técnicas de Laboratorio”, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México. pp. 1-3, 8.
- [17] **Edwards D. A., Luthy G. R., y Liu Z. (1991).** “Solubilization of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Micellar Nonionic Surfactant Solutions”. Environ. Sci. Techno, Vol. 25, No. 1. pp. 127-133.
- [18] **Ellis W. D., Payne, J. R., McNabb, G. D. (1995).** “Treatment of Contaminated Soil with Aqueous Surfactants”; EPA/600/2-85/129, U.S. Environmental Protection Agency, Hazardous Waste Engineering Research Laboratory, NJ, USA.
- [19] **F.A.L. Dullien. (1979).** “Porous Media. Fluid Transport and Pore Structure”. Academy Press Inc. London LTD. pp. 80, 81, 255
- [20] **Fassbender, Hans W. (1987).** “Química de suelos con énfasis en suelos de América Latina”. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, Costa Rica. pp. 135-143
- [21] **Fox, R. D. (1996).** “Physical/Chemical Treatment of organically contaminated soils and sediments”. J. Air and Waste Management Association. pp. 391-413.
- [22] **Freeman M. H. y Harris F. E. (1995).** “Hazardous Waste Remediation Innovative Treatment Technologies”. Technomic Publishing Company, Inc. USA, pp. 103-111, 121, 131.
- [23] **Freeze, R. A. y Cherry, J. A. (1979).** “Groundwater”. Prentice-Hall, New Jersey, USA, pp. 402-407, 444-447.
- [24] **Fuller, W. A. y Warrick, A. W. (1988).** “Soils in waste treatment and utilization”. CRC Press, Florida, USA. pp.36-51,180-185.
- [25] **Gandoy B. W. (1992).** “Manual de laboratorio para el manejo físico de suelos”. Departamento de suelos, Universidad Autónoma de Chapingo, México, pp. 9-13, 17-24.
- [26] **García N. G. (1996).** “Evaluación de parámetros de adsorción de compuestos orgánicos halogenados (TCE Y PCE) en diferentes tipos de suelos”. Tesis, DEPMI, UNAM pp. 38-40, 42-44, 65-70.
- [27] **Gavande S. A. (1991).** “Física de suelos, principios y aplicaciones” Editorial Limusa, México, pp. 159-164.
- [28] **Geller D.P. (1995).** “Surfactants. The theory behind soap”. ARTA Software Group and David P. Geller.
- [29] **George E. P. Box, William G Hunter and J. Stuart Hunter (1993).** “Estadística para investigadores (Introducción al diseño de experimentos, análisis de datos y construcción de modelos)”. Editorial Reverte pp. 317-335.

- [30] http://química.univalle.edu.co/interes/hojas_seguridad/antraceno.htm
- [31] http://química.univalle.edu.co/interes/hojas_seguridad/1,2-diclorobenceno.htm
- [32] **IASR(2001)**. “Fundamental Surfactant Research”. Institute for Applied Surfactant Research.
- [33] **Iturbe A. R., Castro R. A. y Madrigal M. I. (1998)**. “Técnicas de Rehabilitación de suelos y acuíferos”. Series del Instituto de Ingeniería, No. 612. UNAM, pp. 9-13, 20-26.
- [34] **Iturbe A. R. y Silva M. A. E. (1992)**. “Agua subterránea y contaminación”. Series del Instituto de Ingeniería, No. 539. UNAM, pp. 12-19, 26-33.
- [35] **J. Rosen Milton. (1985)**. “ Surfactants Designing Structure for Performance”. Chemical Technology, pp. 293-298.
- [36] **J. C. Fountaine. (1992)**. “Field tests of surfactant flooding. Mobility Control of Dense Nonaqueous-Phase Liquids” American Chemical Society, pp.182-191.
- [37] **James Nash Mason; Hanger-Silas Mason y Richard P. Traver. (1986)**. “Field evaluation of in-situ washing water/surfactants.” Hazardous Waste Engineering Research Laboratory. Pp.208-217.
- [38] **Jimmie R. Baran, Jr., Gary A. Pope, William H. Wade, Vinitha Werasorlya and Anusha Yapa (1994)**. “Micro emulsion formation with chlorinated hydrocarbons of differing polarity”. Environ. Sci. Technol. 28. pp. 1361-1366.
- [39] **Kile D. E.; and Chiou, C.T. (1989)**. “Water Solubility Enhancement of DT and Trichlorobenzene by some Surfactants Below and Above the Critical Micelle Concentration”. Environ. Sci. Technol., 23. 832-838.
- [40] **Klaus M. Rathfelder, Linda M. Abriola., Tammy P. Taylor., Kurt D. Pennell. (2001)**. “Surfactant enhanced recovery of Tetrachloroethylene from a porous medium containing low permeability lenses; 2. Numerical Simulation.” Journal of Contaminant Hydrology. Vol.48, pp. 351-374.
- [41] **Knox R. C., Sabatini D. A., Harwell J. H., Brown R. E., West C. C., Blaha F. Y Griffin C. (1997)**. “Surfactant Remediation Field Demonstration Using a Vertical Circulation Well”. Ground Water, Vol. 35, No. 6, pp. 948-953.
- [42] **Knox R. C., Sabatini D. A. y Canter L. W. (1993)**. “Subsurface transport and fate processes” Lewis Publishers, Inc. USA, pp. 55-65, 71-73.
- [43] **Kosaric N, Cairns W. Y Gray N. C. (1987)**. “Bio surfactants and Biotechnology”. Surfactants science series. Marcel Dekker, New York. Vol. 25 USA.
- [44] **Kostecki P. T. Y Calabrese E. J. (1992)**. “Contaminated soils: Diesel Fuel Contamination”. Lewis Publishers, Inc. USA, pp. 1-19, 165-175.

- [45] **Kurt D. Pennell; Gary A. Pope y Linda M. Abriola. (1996).** “Influence of Viscous and Buoyancy Forces on the Mobilization of Residual Tetrachloroethylene during Surfactant Flushing”. *Environmental Science & Technology*. Vol. 30 No. 4
- [46] **Kurt D. Pennell; Minquan Jin; Linda M. Abriola; Gary A. Pope. (1994).** “Surfactant Enhance Remediation of Soil Columns Contaminated by Residual Tetrachloroethylene”. *Journal of Contaminant Hydrology*. Vol. 16, pp. 35-53
- [47] **Laha, S., Liu, Z., Edwards, D., Luthy, R. G.** “The Potential for solubilizing Agents to Enhance the Remediation of Hydrophobic Organic Solutes in Soil-Water” Suspensions. *Proceedings of the Second Annual IGT/GRI Symposium on Gas, Oil, Coal and Environmental Biotechnology*, New Orleans, LA. December 1989.
- [48] **Linda M. Abriola et al. (1993)** “Surfactant-Enhanced solubilization of residual dodecane in soil columns 2. Mathematical Modelling.” *Environmental Science Technology*, Vol.27. pp. 2341-2351.
- [49] **Low D. (1997).** “Technology Practice Manual for Surfactants and Cosolvents”. *Energy and Environmental System Institute*. Second Edition. pp. 22, 23, 31, 32, 39, 40, 50, 59, 62-65.
- [50] **Lowe D. F., Oubre C. Y Ward H. (1999).** “Surfactants and Cosolvents for NAPL Remediation”. *A Technology Practices Manual*. Lewis Publishers, USA, pp. 5-13, 41-75.
- [51] **Liu Z., Edwards y Luthy R. G. (1992).** “Sorption of non-ionic surfactants onto soil”. *Water Research*, Elsevier Science Ltd. Great Britain, Vol. 26, No. 10, pp. 1337-1345.
- [52] **Madrigal M.I. (1998).** “Alternativas de tratamiento para la rehabilitación de sitios contaminados con hidrocarburos en México”. Tesis, DEPI, UNAM. pp. 9.
- [53] **McCabe W.L., Julian C. Smith., Meter Harriott. (1993).** “Unit Operations of Chemical Engineering” 5 Ed. pp. 154.
- [54] **McDermott, J.B. et. Al. (General Electric Co., Schenectady, NY) (1988).** “Two Strategies for PCB Soil Remediation: Biodegradation and Surfactant Extraction”, 1968 Spring AIChE meeting, New Orleans.
- [55] **Nash, J., and Traver. R. P. (1971).** “Field Evaluation of in-situ Washing of Contaminated Soils with Water Surfactants”. *Proc. Of 12th An. Res. Symp. Cincinnati*, 1986; EPA/600/9-86/022.
- [56] **Nunno T. J., Hyman J. Y Pheiffer T. H. (1988).** “Assessment of international technologies for Superfund applications”. EPA Document No. EPA/540/2-88/003. Office of Solid Waste and Emergency Response, U. S. EPA, Washington, D. C.
- [57] **Palmer, C., Sabatini, D.A.; Harwell, J.H.,** “In Transport and Remediation of Subsurface Contaminants”, ACS Symposium Series 491, Sabatini, D.A., Knox, R.C., Eds. American Chemical Society, Washington DC, 1992.
- [58] **PEMEX. (1999).** “Seguridad, Salud y Medio Ambiente”. PETRÓ LEOS MEXICANOS.

- [59] **Pheiffer T. H. (1990).** “EPA’s assessment of European contaminated soil treatment techniques”. Environmental Prog. pp. 582-587.
- [60] **PROFEPA. (2000).** “Identificación y caracterización de sitios contaminados con residuos peligrosos”. Procuraduría Federal de Protección al Ambiente, México. pp. 19.
- [61] **Raijput, V. S.; Pilapitiya, S.; Singley, M.E.; and Higgins, A.J. (1989).** “Detoxification of hazardous Waste Contaminated Soils and Residues by Washing and Biodegradation. Proc. Intl”. Conf. of Physicochemical and Biological Detoxification of Hazardous Wastes, ed. Wu. Y.C., Technomic pub. Co., Lancaster. P.A. pp. 409-417.
- [62] **Rittmann, B.E.; and Johnson, N.M. (1989).** “Rapid Biological Clean-up of Soils Contaminated with Lubrication Oil, Wat. Sci. Tech., Vol. 21. pp. 209-219.
- [63] **Robert H. Perry., Sexta Edición (2000).** “Manual del Ingeniero Químico”. McGraw Hill, pp. 5-59 a 5-61.
- [64] **Rorty M., Preslo L., Scheinfeld R. y McLearn M. (1992).** “A state of art review of remedial technologies for petroleum contaminated soils and groundwater: Data requirements and efficacy information”. Hydrocarbon contaminated soils and groundwater. Lewis publishers, Inc., USA. pp. 223-225.
- [65] **Rosen M. Y Li F. (2001).** “The relationship between the interfacial properties of surfactants and their toxicity to aquatic organisms”. Environ. Sci. Technol, Vol. 35, No. 5. USA pp. 954-959.
- [66] **S Manne. T.E.Shaffer.,Q Huo., P.K.Hansma., D.E. Morse.,G.D. Stucky y I. A.Aksay. (1997).** “Gemini Surfactants at solid-Liquid Interfaces: Control of Interfacial Aggregate Geometry”. Princeton Materials Institute. Vo. 13.pp.6382-6387
- [67] **Sabatini D. A., Knox R. C. y Harwell J. H. Soerens T., Chen L., Brown R. E., y West C. C. (1997).** “Design of a surfactant remediation Field Demonstration Based on Laboratory and Modelling Studies”. Ground Water, Vol. 35, No. 6, pp. 954-963.
- [68] **Scamehorn, J.F., Harwell, J.H.,** “An overview of Surfactant Based Separation Processes in the Role of surfactants in new and Emerging Technology”, Rosen, M., Marcel Dekker, New York, 1987.
- [69] **Scamehorn, J.F., Harwell, J.H., (editors).** “Surfactant Based Separation Processes. Surfactant” Science Series, Marcel Dekker, Inc. New York, 1989.
- [70] **Shiau B., Sabatini D. A. y Harwell J. H. (1994).** “Solubilization and Micro emulsification of Chlorinated Solvents Using Direct Food Additive (Edible) Surfactants”. Ground Water, Vol. 32, No. 4, July-August. pp. 561-569.
- [71] **Seoáñez C. M. (1999).** “Contaminación del suelo: Estudios, tratamiento y gestión”. Ediciones mundi-Prensa, España, pp. 91-95.

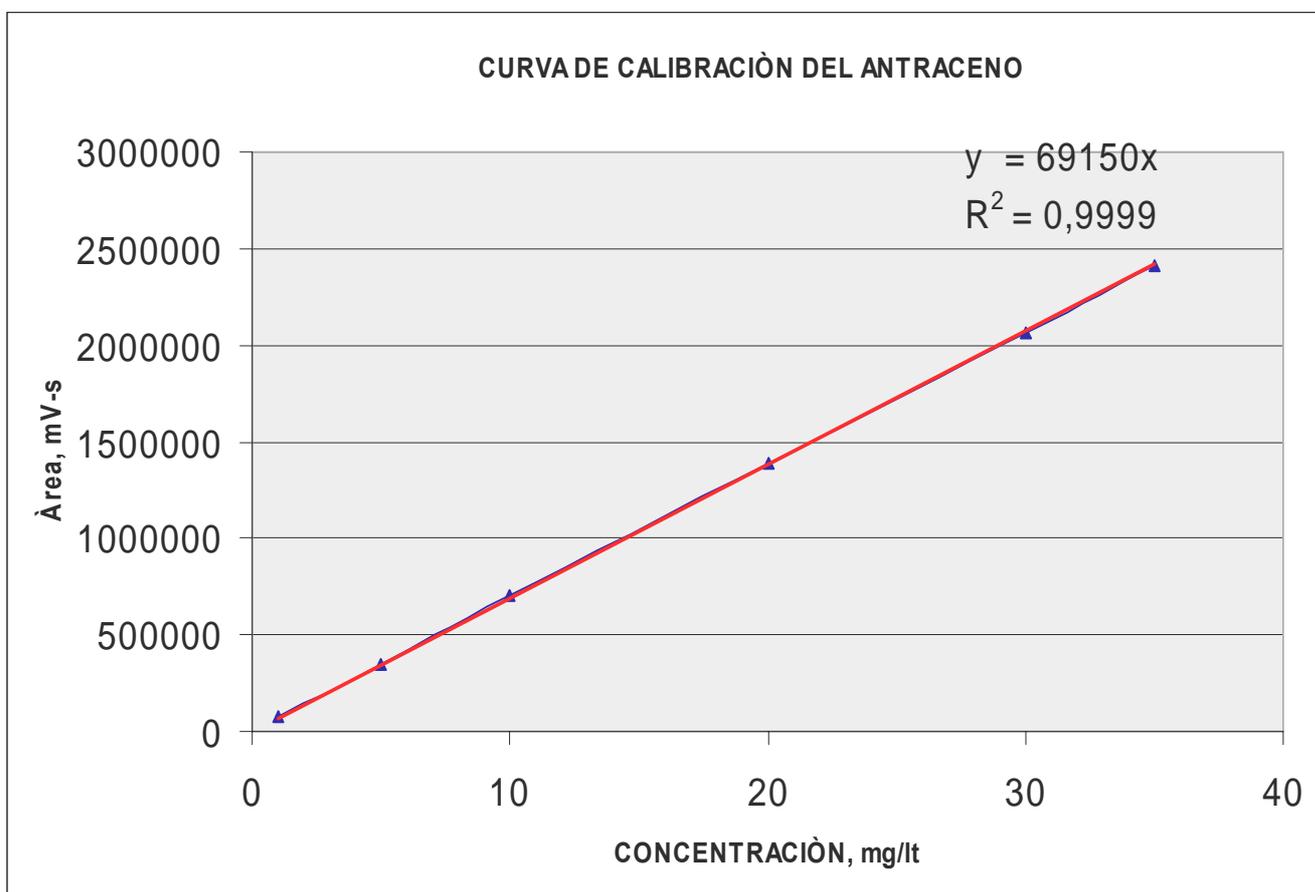
- [72] **Sun y Pury R. K.(1997)** “Surfactant enhanced solubility and mobility of Polycyclic aromatic hydrocarbons in soil.” Environmental Trace Substances Laboratory University of Missouri pp. 1-17.
- [73] **Tammy P. Taylor, Kurt D. Pennell, Linda M. Abriola y Jacob H Dane. (2001).**”Surfactant Enhanced recovery of Tetrachloroethylene from a porous medium containing low permeability lenses. 1. Experimental studies”. Journal of Contaminant Hydrology. Vol 48. pp. 325-350.
- [74] **V Dwarakanath, K. Kostarelos, Gary A. Pope., Doug Shotts.,William H.Wade. (1999).** “Anionic surfactant remediation of soil columns contaminated by Nonaqueous phase liquid”. Journal of Contaminant Hydrology. Vol.38 pp. 465-488.
- [75] **Valsaraj K. T. y Thibodeaux L. J. (1989).** “Relationships between micelle-water and octanol-water partition constants for hydrophobic organics of environmental interest”. Water Research Vol. 23, No. 2, pp. 183-189.
- [76] **Vigon B. W. Y Rubin A. J. (1989).** “Practical Considerations in the Surfactant Aided Mobilization of Contaminants in Aquifers”. Journal of the Water Pollution Control Federation, Vol. 61, No. 7, pp. 1233-1240.
- [77] **West C. C. Y Harwell J. H. (1992).** “Surfactants and surface remediation”. Environmental Science Technology Vol. 26, No. 12, pp. 2324-2330.
- [78] **Zarate Muñoz Silvia. (2004).** “Estudio Experimental y Simulación Matemática del Desplazamiento Microscópico de Antraceno y 1,2- Diclorobenceno en un Medio Poroso Utilizando un Surfactante Gemelo en Solución Acuosa”.M.C. Tesis I.P.N. E.S.I.Q.I.E., Sección de Estudios de Posgrado e Investigación. pp. 17,18, 47,48

ANEXO 1.1

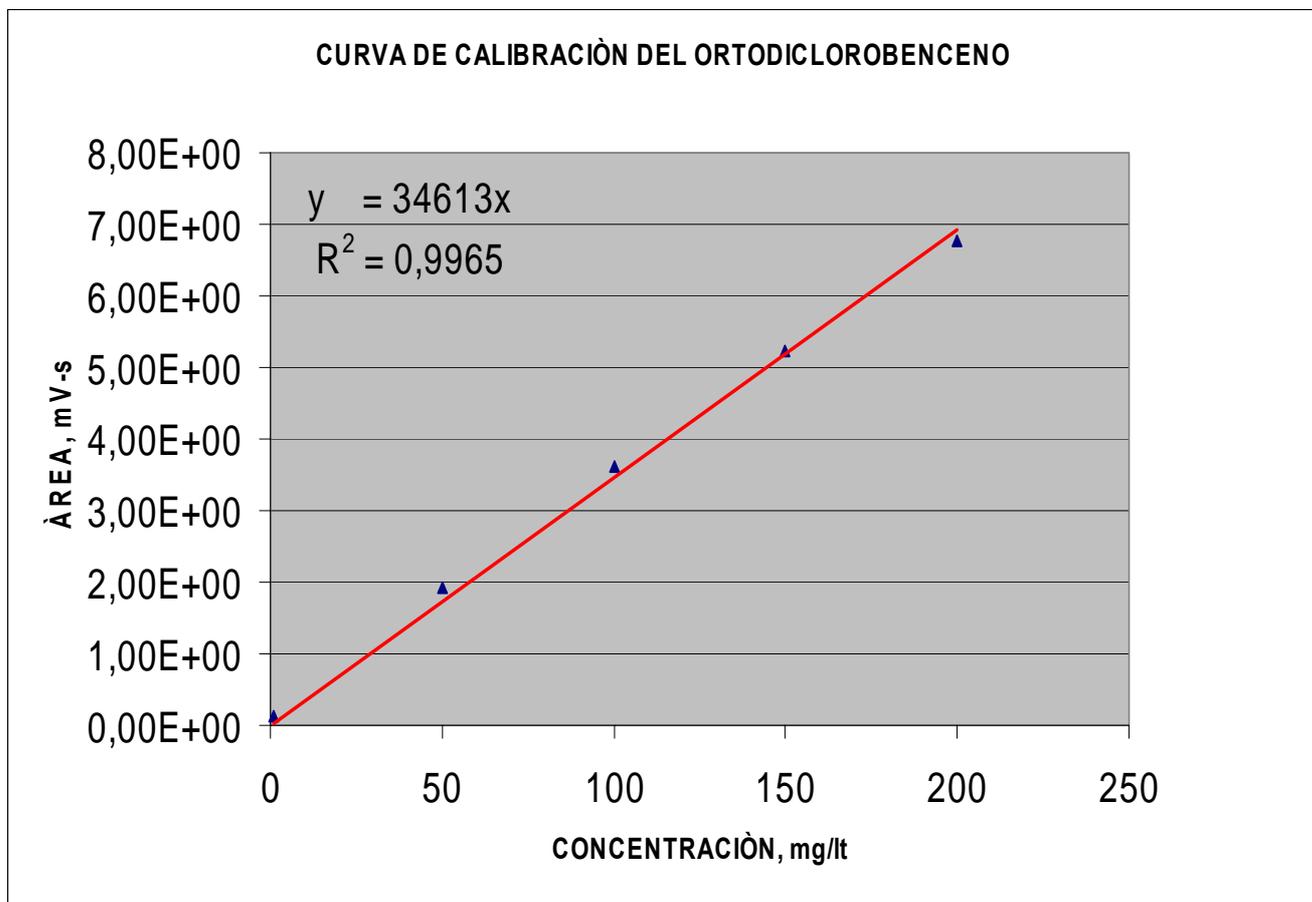
A N E X O 1.1. Obtención de las Curvas de Calibración para el Antraceno y el Ortodichlorobenceno.

La fase móvil seleccionada se filtró y se desgasificó antes de acoplarse al HPLC, se utilizó la Bomba Isocrática con un flujo de 1ml/min. Y se programó el HPLC para que tomara una muestra de 30 μ L para su análisis, las muestras previamente a instalarse en el vial se filtran con una jeringa acoplada a un filtro denominado Acrodisco de Gelman de 1 μ de material nylon, para evitar sólidos (basuras) en suspensión.

Una vez efectuado lo anterior con todas las muestras para el análisis correspondiente, se obtuvieron las Gráficas de Calibración, mismas que se indican a continuación:



Gráfica de Calibración para el Contaminante Antraceno



Gràfica de Calibració para el Contaminante Ortodihalobenceno

ANEXO 1.2

A N E X O 1.2. Obtención de los Cromatogramas

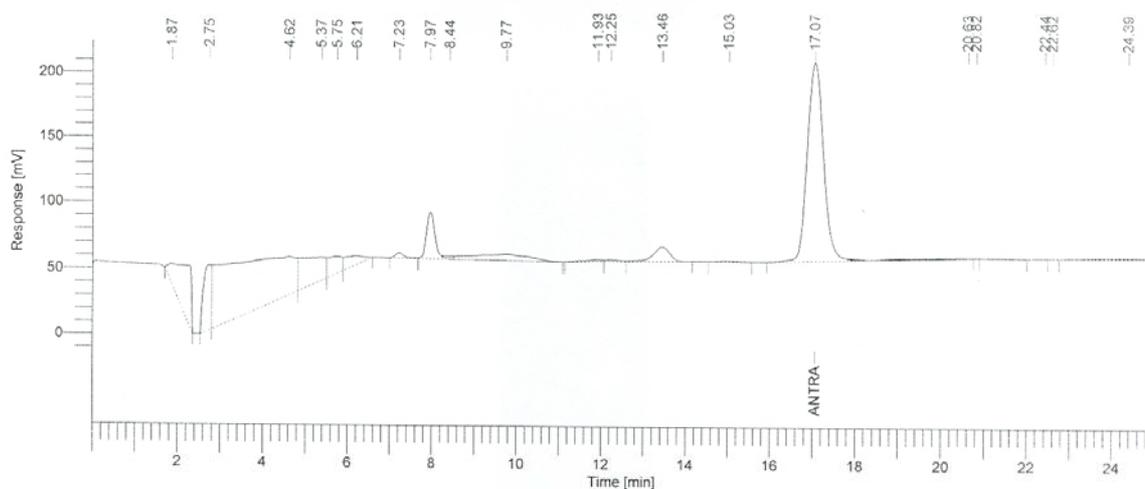
Debido a que dentro de los objetivos de esta experimentación se encuentra determinar las concentraciones del contaminante movilizado, se utilizó un Cromatógrafo de Líquidos de Alta Resolución (HPLC) Perkin-Elmer Serie 200 acoplado a un Detector UV/vis Serie 200 y una Columna Spheri – 5 μ , Fase Estacionaria Silica C-18, acoplado al Software del Turbochrom de Perkin-Elmer, mismo que se utilizó para analizar el contaminante.

A continuación presentamos los cromatogramas del antraceno y del ortodichlorobenceno:

Software Version : 6.2.1.0.104:0104
 Sample Name :
 Instrument Name : HPLC
 Rack/Vial : 0/0
 Sample Amount : 1.000000
 Cycle : 1

Date : 09/05/2005 07:08:24 p.m.
 Data Acquisition Time : 09/05/2005 01:34:52 p.m.
 Channel : A
 Operator : JLVIVERO
 Dilution Factor : 1.000000

Result File : C:\CROMATOGRAFIA\RESULTADOS\VMT\malo005.rst
 Sequence File : C:\secuencias\MALOBIS.seq



Cuantificación de antraceno

Pico No.	Time [min]	Componente	Area [$\mu\text{V}\cdot\text{s}$]	Altura [μV]	Area/Cantidad
15	17.07	ANTRACENO	4016432.43	151854.07	2305.0161
			4016432.43	151854.07	2305.0161

Missing Component Report

Component Expected Retention (Calibration File)

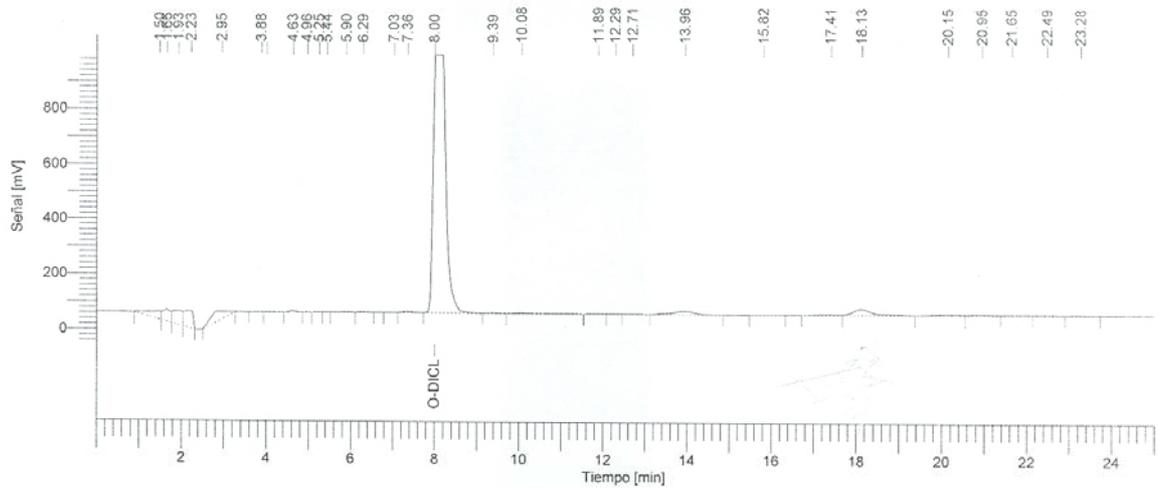
All components were found

Cromatograma de Antraceno a un Flujo de 1.2 GPM.

Software Version : 6.2.1.0.104:0104
 Sample Name :
 Instrument Name : HPLC
 Rack/Vial : 0/0
 Sample Amount : 1.000000
 Cycle :

Date : 09/05/2005 06:47:50 p.m.
 Data Acquisition Time : 08/05/2005 05:12:50 a.m.
 Channel : A
 Operator : JLVIVERO
 Dilution Factor : 1.000000

Result File : C:\CROMATOGRAFIA\RESULTADOS\VMT\bueno010.rst
 Sequence File : C:\secuencias\bueno-20050508-002818.seq



Cuantificación de o-diclorobenceno

Componente	Tiempo [min]	Area [uV*sec]	Altura [uV]
O-DICLOROBENCEN	8.000	19405839.60	935408.75
		19405839.60	935408.75

Warning -- Signal level out-of-range in peak

Cromatograma de Ortodiclorobenceno a un Flujo de 1.2 GPM.

ANEXO 1.3

ANEXO 1.3. Obtención de los Datos para las Curvas de Saturación

Cálculo del % Volumen de Saturación.

Procederemos al cálculo del % Volumen de Saturación:

Peso total de Contaminante movilizado

$$W_{\text{total movilizado}} = W_{\text{Antraceno}} + W_{\text{Ortodiclorobenceno}} = W_{\text{t movilizado}} \quad (42)$$

Volumen total de Contaminante movilizado

$$V_{\text{total movilizado}} = \frac{W_{\text{t movilizado}}}{\rho_{\text{contaminante}}} = V_{\text{t movilizado}} \quad (43)$$

Volumen Contaminante en medio poroso = $V_{\text{cont. medio poroso}}$; Volumen de poro = V_{poro}

$$\% \text{ de Saturación} = \frac{V_{\text{contaminante en medio poroso}} - V_{\text{t movilizado}}}{V_{\text{poro}}} \times 100 \quad (44)$$

Áreas Obtenidas de los Cromatogramas para el Antraceno y Ortodiclorobenceno

Cromatograma No.	Contaminante	Flujo GPM	Área
1	Antraceno	1.2	3,969,332.83
2	Antraceno	1.1	3,097,959.33
3	Antraceno	1.0	845,394.79
4	Antraceno	0.9	681,994.00
5	Antraceno	0.85	659,458.87
6	Antraceno	1.2	4,016,432.43
7	Antraceno	1.1	3,066,799.00
8	Antraceno	1.0	2,111,143.10
9	Antraceno	0.9	1,432,915.00
10	Antraceno	0.85	1,141,562.78
11	Ortodiclorobenceno	1.2	19,405,839.60
12	Ortodiclorobenceno	1.1	17,185,711.58
13	Ortodiclorobenceno	1.0	2,457,465.23
14	Ortodiclorobenceno	0.9	951,887.88
15	Ortodiclorobenceno	0.85	862,845.10
16	Ortodiclorobenceno	1.2	18,213,766.05
17	Ortodiclorobenceno	1.1	4,752,809.01
18	Ortodiclorobenceno	1.0	3,406,197.41
19	Ortodiclorobenceno	0.9	3,125,452.00
20	Ortodiclorobenceno	0.85	904,709.16

Peso de Antraceno Movilizado en la Arena.

Flujo GPM	Área	Pendiente *	ppm (mg/L)	Volumen muestra (L)	mg
1.2	3,969,332.83	69,150	57.4017	6.7	384.6
1.1	3,097,959.33	69,150	44.8006	5.3	237.4
1.0	845,394.79	69,150	12.2246	4.6	56.2
0.9	681,994.00	69,150	9.8625	3.5	34.5
0.85	659,458.87	69,150	9.5366	3.0	28.6

Peso del Ortodichlorobenceno Movilizado en la Arena.

Flujo GPM	Área	Pendiente **	ppm (mg/L)	Volumen muestra (L)	mg
1.2	19,405,839.60	34,613	560.6517	6.7	3,756.4
1.1	17,185,711.58	34,613	496.5103	5.3	2,631.5
1.0	2,457,465.23	34,613	70.9983	4.6	326.6
0.9	951,887.88	34,613	27.5009	3.5	96.2
0.85	862,845.10	34,613	24.9283	3.0	74.8

Peso de Antraceno Movilizado en las Esferas de Vidrio.

Flujo GPM	Área	Pendiente *	ppm (mg/L)	Volumen muestra (L)	mg
1.2	4,016,432.43	69,150	58.0829	5.5	319.4
1.1	3,066,799.00	69,150	44.3500	4.3	190.7
1.0	2,111,143.10	69,150	30.5300	3.6	109.9
0.9	1,432,915.00	69,150	20.7218	3.0	62.2
0.85	1,141,562.78	69,150	16.5085	2.3	38.0

Peso del Ortodichlorobenceno Movilizado en las Esferas de Vidrio.

Flujo GPM	Área	Pendiente **	ppm (mg/L)	Volumen muestra (L)	mg
1.2	18,213,766.05	34,613	526.2117	5.5	2,894.2
1.1	4,752,809.90	34,613	137.3128	4.3	590.4
1.0	3,406,197.41	34,613	98.4080	3.6	354.3
0.9	3,125,452.00	34,613	90.2971	3.0	270.9
0.85	904,709.16	34,613	26.1378	2.3	60.1

* ver Curva de Calibración del Antraceno. Anexo 1.1. Página 91

** ver Curva de Calibración del Ortodichlorobenceno. Anexo 1.1. Página 91

% de Saturación en la Arena.

Flujo GPM	mg Antrace	mg ODCB	W_t mg	V_c cm³	V_{PO} cm³	% de
1.2	384.6	3,756.4	4,141.0	3.215	734.	0.3792
1.1	237.4	2,631.5	2,868.9	2.227	734.	0.0760
1.0	56.2	326.6	382.8	0.297	734.	0.0355
0.9	34.5	96.2	130.7	0.102	734.	0.0216
0.85	28.6	74.8	103.4	0.080	734.	0.0107

$$V_c = 5.921 \text{ cm}^3$$

% de Saturación en las Esferas de Vidrio.

Flujo GPM	mg Antrace	mg ODCB	W_t mg	V_c cm³	V_{PO} cm³	% de
1.2	319.4	2,894.2	3,213.6	2.495	694.	0.2885
1.1	190.7	590.4	781.1	0.607	694.	0.2012
1.0	109.9	354.3	464.2	0.360	694.	0.1494
0.9	62.2	270.9	333.1	0.259	694.	0.1122
0.85	38.0	60.1	98.1	0.076	694.	0.1012

$$V_c = 3.797 \text{ cm}^3$$

Resultados del % de Saturación en Términos del Número Total de Atrapamiento (Total Trapping Number).

Procedimos a la construcción de las Gráficas del **% de Saturación en Términos del Número Total de Atrapamiento (Total Trapping Number)**, basados en los valores del Número Total de Atrapamiento (Total Trapping Number) y el % de Saturación, tanto Experimental como Teórico, para las esferas de vidrio, indicados en las Tablas 4.9. y 4.10. Página 59 y para arena Tablas 4.19. y 4.20. Página 63.

ANEXO 1.4

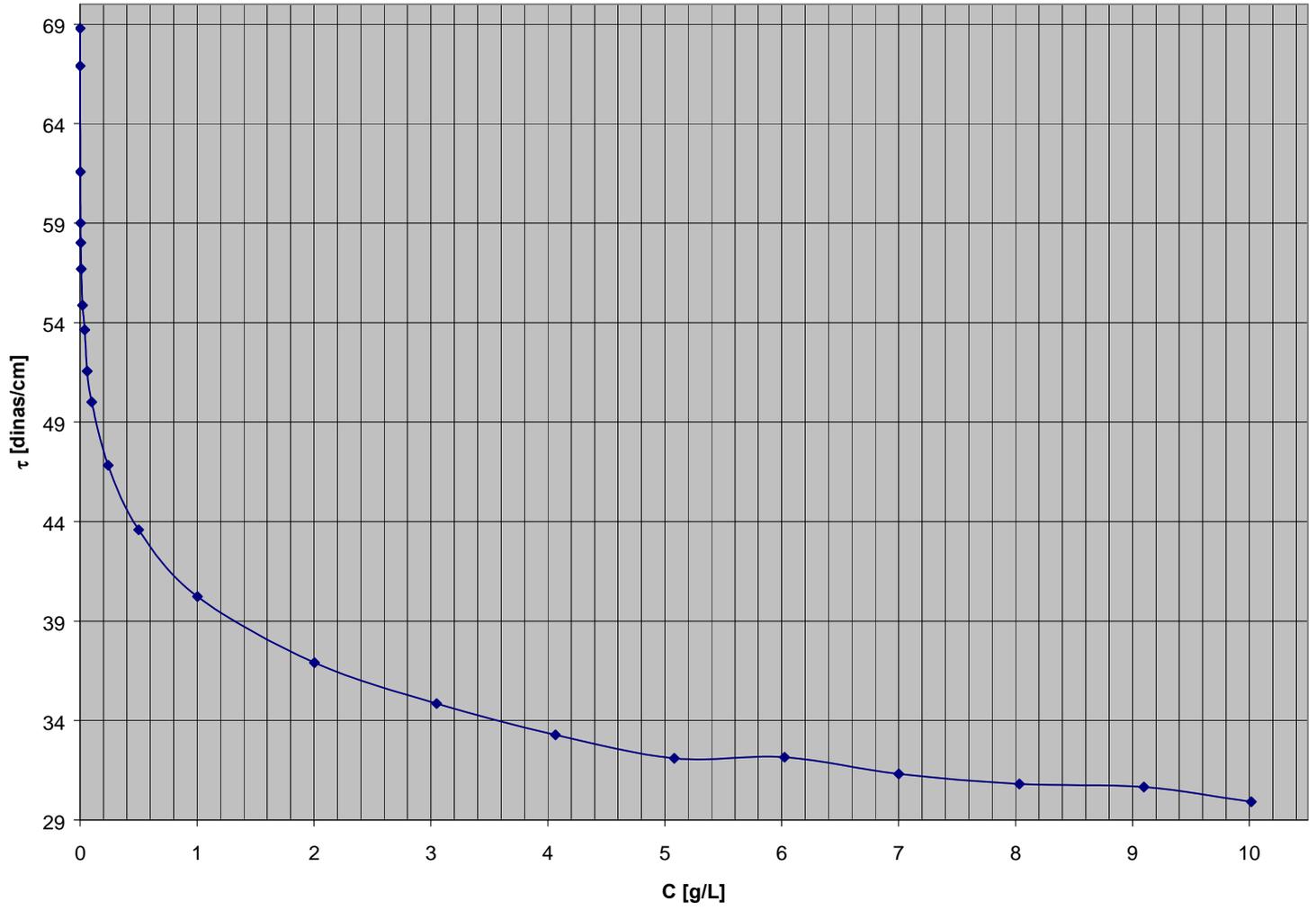
**Determinación de la tensión superficial del
Surfynol 465 obtenidos con el Tensiómetro
Manual Tipo du Noüy**

C [g/L]	W [g]	ρ [g/L]	T [°C]	τ_1	τ_2	τ_3	τ_{prom}
				[dinas/cm]	[dinas/cm]	[dinas/cm]	[dinas/cm]
0.0000	93.8691	0.9955	21.8	73.7	73.5		73.6
0.0008	93.6354	0.9908	21.8	71.8	71.5	71.8	71.7
0.0024	93.8803	0.9957	21.6	66.0	66.8	66.4	66.4
0.0040	93.8779	0.9956	21.8	63.6	64.0	63.8	63.8
0.0056	93.8781	0.9956	21.8	62.6	63.0	62.8	62.8
0.0096	93.8868	0.9958	21.6	61.6	61.2	61.6	61.5
0.0200	93.8479	0.9950	22.2	59.8	59.2	59.8	59.6
0.0401	93.6695	0.9915	19.0	58.7	58.1	58.2	58.3
0.0601	93.899	0.9961	19.0	56.5	56.8	55.4	56.2
0.1002	93.8959	0.9960	19.2	55.0	53.9	55.0	54.6
0.2406	93.8965	0.9960	19.0	51.2	51.6	51.3	51.4
0.5012	93.8963	0.9960	19.4	47.9	48.1	48.0	48.0
1.0024	93.9224	0.9965	19.4	44.2	44.6	44.7	44.5
2.0047	93.9044	0.9962	19.4	41.2	40.9	40.9	41.0
3.0485	93.903	0.9961	19.6	39.0	38.8	38.7	38.8
4.0646	93.8954	0.9960	19.8	37.3	37.2	37.0	37.2
5.0808	93.9198	0.9965	19.6	35.7	36.0	36.0	35.9
6.0250	93.9396	0.9969	18.2	35.9	36.0	36.0	36.0
7.0020	93.9445	0.9970	18.0	35.2	35.0	35.0	35.1
8.0330	93.9551	0.9972	18.2	34.6	34.6	34.4	34.5
9.0980	93.9504	0.9971	18.2	34.1	34.8	34.2	34.4
10.0170	93.9587	0.9972	18.2	33.4	33.7	33.6	33.6
C [g/L]	F	τ_{corr} [dinas/cm]					
0.0000	0.9346	68.8					
0.0008	0.9330	66.9					
0.0024	0.9274	61.6					
0.0040	0.9248	59.0					
0.0056	0.9238	58.0					
0.0200	0.9205	54.9					
0.0401	0.9194	53.6					
0.0601	0.9170	51.6					
0.1002	0.9153	50.0					
0.2406	0.9117	46.8					
0.5012	0.9080	43.6					
1.0024	0.9041	40.2					
2.0047	0.9001	36.9					
3.0485	0.8976	34.9					
4.0646	0.8956	33.3					
5.0808	0.8941	32.1					
6.0250	0.8941	32.2					
7.0020	0.8930	31.3					
8.0330	0.8924	30.8					
9.0980	0.8922	30.7					
10.0170	0.8912	29.9					

C [g/L]	τ_{corr} [dinas/cm]		
0.0000	68.8	58.128852	
0.0008	66.9	58.1111053	
0.0024	61.6	58.0756118	
0.0040	59.0	58.0401184	
0.0056	58.0	58.0046249	
0.0096	56.7	57.9158913	
0.0200	54.9	57.6851839	
0.0401	53.6	57.2415158	
0.0601	51.6	56.7978478	
0.1002	50.0	55.9105116	
0.2406	46.8	52.8048351	
0.5012	43.6	47.0371501	
1.0024	40.2	35.9454482	37.692128
2.0047	36.9		36.705939
3.0485	34.9		35.6789879
4.0646	33.3		34.6792116
5.0808	32.1		33.6794352
6.0250	32.2		32.7504587
7.0020	31.3		31.7892109
8.0330	30.8		30.7748339
9.0980	30.7		29.727005
10.0170	29.9		28.8228221
0.0000	58.128852		
0.0008	58.1111053		
0.0024	58.0756118		
0.0040	58.0401184		
0.0056	58.0046249		
0.0096	57.9158913		
0.0200	57.6851839		
0.0401	57.2415158		
0.0601	56.7978478		
0.1002	55.9105116		
0.2406	52.8048351		
2.0047		36.705939	
3.0485		35.6789879	
4.0646		34.6792116	
5.0808		33.6794352	
6.0250		32.7504587	
7.0020		31.7892109	
8.0330		30.7748339	
9.0980		29.727005	
10.0170		28.8228221	

Gráfica de la CMC del Surfynol 465

Determinación de la CMC del Surfynol 465



Gráfica de Regresión Lineal para la determinación del CMC del Surfactante Gemelo Surfynol 465

Determinación de la CMC del Surfynol 465

