



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

01174

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA

Entidad Participante: Facultad de Ingeniería

***"CARACTERIZACIÓN DEL FLUIDO ESPUMADO DE
PERFORACIÓN (BPU) EN PRESENCIA DE
CONTAMINANTES SÓLIDOS Y LÍQUIDOS"***

T E S I S

PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN INGENIERÍA PETROLERA
PRESENTA:

CAMILO ERNESTO LIBREROS MUÑOZ

TUTOR:

Dr. VICENTE CASARIEGO GONZALEZ

MÉXICO D.F.

JUNIO 2003





Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas

Tesis Digitales

Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©

PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

AGRADECIMIENTOS

AGRADECIMIENTOS.

Esta maestría no hubiera podido culminarla de una manera satisfactoria sin la invaluable ayuda y colaboración de muchísimas personas que de una u otra forma me ayudaron en este camino, y como este papel es finito, no alcanzaré a expresarle a cada uno mi mas sentido agradecimiento de manera escrita, sin embargo, lo hago en forma de recuerdo sincero que perdurará el tiempo que esté en esta comedia trágica llamada vida...

Empiezo estos cortos agradecimientos con los principales artífices de lo que ahora soy, dos pedagogos enormes en su arte de maestros y de padres, a mis dos más férreos pilares, amigos y confidentes, mi papá Héctor Fabio Libreros Jaramillo y mi mamá Margoth Muñoz de Libreros por todo y cada uno de su valioso tiempo invertido en nosotros.

A mis hermanos; a Vladimir por este feliz reencuentro en la distancia del hogar y de los años, muchísimas gracias por tu ayuda; a Tania por ser la conciencia de las mujeres reunida en consejos y paciencia y a Pablo por demostrarme definitivamente que cuando oscurece es por que el amanecer se acerca.

Lógicamente agradezco a la inmensa y muy honorable Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) por acogerme en sus aulas de conocimiento y por darme la ayuda necesaria para lograr sacar la maestría satisfactoriamente y por darme las herramientas necesarias para seguir el incesante proceso de crecimiento intelectual.

A mi compañera durante este camino Angélica María Ríos Álvarez quien sufrió estoica y pacientemente el ser enamorada y adoctrinada a la vez con procesos no siempre muy agradables, a ella millones de gracias por soportarme y tolerarme.

A mis compañeros que siempre estuvieron presentes para ayudarme tanto en la academia como fuera de ella, a Cesar Bernal, Edgar Sánchez, Miguel Castellanos, muchísimas gracias.

Para mis maestros y colegas Daniel García Gavito, José Antonio González Guevara, que muestran la inquietud y fraternidad digna de los investigadores con vocación humana.

Y finalmente a mi asesor en el camino de esta investigación, el Dr. Vicente Casariego González muchísimas gracias.

CONTENIDO	PÁGINA
<u>NOMENCLATURA</u>	
<u>RESUMEN</u>	
<u>INTRODUCCIÓN</u>	
<i>Objetivos</i>	
<i>Justificación</i>	
<u>CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO</u>	
<i>I.1 Definición De Términos.</i>	<i>1</i>
<i>I.1.1. Perforación Convencional o Sobre-Balance</i>	<i>1</i>
<i>I.1.2. Perforación Bajo-Balance</i>	<i>1</i>
<i>I.1.3. Técnicas De Perforación Bajo-Balance</i>	<i>2</i>
<i>I.2 Perforación Con Espumas.</i>	<i>4</i>
<i>I.2.1. Introducción</i>	<i>4</i>
<i>I.2.1.1. Fase Continua</i>	<i>6</i>
<i>I.2.1.2. Calidad De La Espuma</i>	<i>7</i>
<i>I.2.1.3. Beneficios De Usar Espumas</i>	<i>8</i>
<i>I.2.1.4. Limitaciones De Las Espumas</i>	<i>11</i>
<i>I.2.1.5. Renovado Interés En Las Espumas</i>	<i>11</i>
<i>I.2.2. Química Básica De Las Espumas</i>	<i>13</i>
<i>I.2.2.1. Estructura De Las Espumas</i>	<i>13</i>
<i>I.2.2.2. Dinámica De Las Espumas</i>	<i>14</i>
<i>I.2.2.3. Estabilización y Preservación De Espumas</i>	<i>16</i>
<i>I.2.2.4. Química De Las Espumas</i>	<i>18</i>
<i>I.2.2.5. Agentes Espumantes</i>	<i>18</i>
<i>I.2.2.6. Inhibidores de Corrosión</i>	<i>19</i>
<i>I.2.2.7. Polímeros</i>	<i>21</i>
<i>I.2.2.8. Estabilizadores de Arcillas y Lutitas</i>	<i>22</i>
<i>I.2.3. Limpieza Del Agujero</i>	<i>24</i>
<i>I.2.3.1. Capacidad de Levantamiento</i>	<i>24</i>
<i>I.2.3.2. Limpieza del Agujero</i>	<i>26</i>
<i>I.2.3.3. Mantenimiento de la Calidad de la Espuma</i>	<i>26</i>
<i>I.2.3.4. Velocidades del Fluido</i>	<i>28</i>

1.2.3. Reología E Hidráulica de Las Espumas	30
1.2.4.1. Hidráulica Básica	31
1.2.4.2. Variables Inherentes al fluido	32
1.2.4.3. Variables Ambientales de Perforación	34
1.2.4.4. Variables Controlables	36
1.2.4.5. Modelos Reológicos	38
1.2.4.6. Ecuaciones de Flujo de las Espumas	47
1.2.4.7. Modelamiento de Afluentes	53
1.2.4.8. Capacidad de Acarreo de Recortes	54
<u>CAPÍTULO II: METODOLOGÍA EXPERIMENTAL</u>	63
II.1 Características del Fluido.	63
II.2 Variables.	65
II.2.1. Tipos de Variables	65
II.2.2. Definición de Variables	65
II.2.3. Matriz de Vester	66
II.2.3.1. Operación de Variables	68
II.2.3.2. Manejo de Variables para las Pruebas	72
II.2.4. Hipótesis	79
II.3 Matriz de Pruebas.	80
II.3.1. Sujetos de Investigación	82
II.3.2. Programación de las Pruebas	83
II.4 REQUERIMIENTO DE MATERIALES.	84
<u>CAPÍTULO III: PROCEDIMIENTOS TEÓRICOS</u>	86
III.1 Fracciones Componentes De La Espuma	86
III.2 Cálculo De Propiedades Físicas Con Contaminantes	88
III.2.1. Densidad	88
III.2.1.1. Fase Gas	89
III.2.1.2. Fase Líquida	97
III.2.2. Viscosidad	103
III.2.2.1. Fase Gas	104
III.2.2.2. Fase Líquida	106

<u>CAPÍTULO IV: ANÁLISIS ESTADÍSTICO</u>	108
<i>IV.1 Variables de Influencia</i>	108
<i>IV.2 Resultado Estadístico de las Pruebas</i>	109
<i>IV.2.1. Diseño de las Pruebas de Laboratorio</i>	109
<i>IV.2.2. Diseño Experimental</i>	110
<i>IV.2.2.1. Varianza Muestral, Desviación Estándar Muestral y Coeficiente de Variación Muestral.</i>	113
<i>IV.2.3. Niveles de Análisis de las Variable Independientes</i>	116
<i>IV.2.4. Variable Dependiente</i>	117
<i>IV.2.5. Interacciones de las Variables</i>	119
<i>IV.2.6. Representaciones gráficas de efectos e Interacciones</i>	123
<i>IV.2.6.1. Interacción Calidad – Concentración de (NaCl) en la salmuera</i>	124
<i>IV.2.6.2. Interacción Porcentaje de Contaminación - Concentración de (NaCl) en la salmuera</i>	126
<i>IV.2.6.3. Interacción Calidad – Porcentaje de Contaminación en la salmuera</i>	127
<i>IV.2.7. Representaciones gráficas de efectos de los Cambios de Nivel de las Variables Independientes</i>	129
<i>IV.2.7.1. Efecto Debido al Cambio de Nivel de la Variable Calidad</i>	129
<i>IV.2.7.2. Efecto Del Cambio de Nivel de la Variable Concentración de (NaCl) en la salmuera</i>	132
<i>IV.2.7.3. Efecto Del Cambio de Nivel de la Variable Porcentaje de Contaminación.</i>	133
<i>IV.2.7.4. Efecto Del Cambio de Nivel de las tres Variables Independientes.</i>	134
<u>CAPÍTULO V: ANÁLISIS DE DATOS</u>	136
<i>V.1 Procedimiento</i>	136
<i>V.1.1. Instrumentos</i>	136
<i>V.1.2. Procedimientos</i>	137
<i>V.2 Resultados</i>	142
<i>V.2.1. Manejo de Resultados</i>	150
<i>V.2.2. Análisis de Resultados</i>	151
<i>V.2.3. Análisis de Resultados corrigiendo la calidad de la espuma por porcentaje de contaminación con salmuera.</i>	164
<i>V.2.4. Análisis de Resultados para pruebas con diesel</i>	180

<u>CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</u>	181
<i>VI.1 Conclusiones</i>	181
<i>VI.2 Recomendaciones</i>	184
<u>BIBLIOGRAFÍA</u>	185
<u>ANEXOS</u>	189

NOMENCLATURA.

CAPÍTULO I.

B'	=	Segundo coeficiente del Virial Modificado (psia^{-1}).
D	=	Diámetro Interior de la sarta, (in).
D_h	=	Diámetro de hueco abierto, (in).
D_p	=	Diámetro Exterior de la tubería de perforación, (in).
d_s	=	Diámetro de la partícula o disco, (in).
f	=	Factor de Fricción de Fanning.
f_{go}	=	fracción másica del gas inyectado (fracción).
f_{gi}	=	Fracción másica del gas de formación (fracción).
g	=	Aceleración de la gravedad (ft/s^2).
g_c	=	32.2 ($\text{ft-lbm})/(\text{lbf-s}^2)$.
h	=	Espesor del disco (ft).
K	=	Índice de consistencia ($\text{lbf.s}^n/\text{ft}^2$).
MD	=	Profundidad Medida, (Ft).
M_g	=	Peso Molecular del Gas (lbm/lb-mol).
M_{go}	=	Peso molecular del gas de la espuma (lb/lbmol).
M_{gi}	=	Peso molecular del gas de Formación (lb/lbmol).
N	=	Número de entradas de agua y aceite.
n	=	Índice de comportamiento de flujo. (Adimensional).
N_{re}	=	Número de Reynolds (Adimensional).
P	=	Presión Absoluta (Psia).
P₁	=	Presión arriba de la boquilla. (Psi).
P₂	=	Presión en el fondo del Pozo. (Psi).
P^e	=	Exceso de Presión debida a la Tensión superficial (psi).
q_i	=	Ritmo de entrada o afluente de agua y aceite (Gal/min).
q_o	=	Ritmo de Inyección de Líquido (gal/min).
R	=	Constante de los Gases, $10.73 \frac{(\text{psia}).(\text{ft}^3)}{(\text{lb-mol}).(^{\circ}\text{R})}$.
r	=	Radio de la burbuja (in).

NOMENCLATURA.

T	=	Temperatura Absoluta ($^{\circ}\text{R}$).
u	=	Velocidad Promedio de la Espuma, (ft/s).
Ua	=	Velocidad Media anular (ft/seg).
U_n	=	Velocidad en la boquilla. (Ft/s).
V	=	Volumen específico de la Espuma (1/p).
VD	=	Profundidad Vertical, (Ft).
V_g	=	Volumen Específico del Gas (Ft^3/lb).
V_{sl}	=	Velocidad de deslizamiento, (Ft/s).
Z	=	Factor de Compresibilidad del Gas.
τ	=	Esfuerzo de Corte (lb/ft^2).
γ	=	Velocidad de Corte (s^{-1}).
τ_y	=	Esfuerzo de Cedencia (lb/ft^2).
μ_F	=	Viscosidad de la espuma (cp).
μ_L	=	Viscosidad de la base líquida (cp).
μ_p	=	Viscosidad plástica del fluido (cp).
Γ	=	Calidad de la espuma (Fracción).
σ	=	Tensión Superficial (lb/in).
ρ_f	=	Densidad de la espuma, (lb/gal).
ρ_r	=	Densidad del sólido, (lb/gal).
ρ_o	=	Densidad del líquido de la espuma (lb/gal).

CAPÍTULO II.

Las variables son:

- A. Ritmo de Inyección de gas.
- B. Ritmo de inyección del líquido.
- C. Contrapresión.
- D. Densidad de la espuma.
- E. Viscosidad de la espuma.
- F. Contenido de contaminantes en el fluido.

NOMENCLATURA.

G. Temperatura.

H. Presión.

I. Contaminantes.

Las variables para desarrollar las pruebas son:

X1: Calidad de la Espuma.

X2: Concentración de sal en la salmuera.

X3: Porcentaje en volumen de contaminación con salmuera.

X4: Tiempo de vida media de la Espuma.

X5: Tipo de sal en la salmuera.

X6: Porcentaje de Aceite como contaminante.

CAPÍTULO III.

B_o = Factor volumétrico del aceite (bbl/STB).

B_w = Factor volumétrico de formación (ft³/STft³).

C_{ppm} = Salinidad en (ppm).

C_{vi} = Fracción en volumen del componente o fase i.

C_{wi} = Fracción en peso del componente o fase i.

F_{go} = Fracción en volumen de gas a una presión P_o y Temperatura T_o.

F_{gp} = Fracción en volumen de gas a una presión P y Temperatura T.

F_{fo} = Fracción en volumen de líquido a una presión P_o y Temperatura T_o.

F_{fp} = Fracción en volumen de líquido a una presión P y Temperatura T.

F_{so} = Fracción en volumen de sólido a una presión P_o y Temperatura T_o.

F_{sp} = Fracción en volumen de sólido a una presión P y Temperatura T.

M_a = Peso molecular aparente de la mezcla de gases.

M_j = Peso molecular de cada componente del gas.

n = Número de moles totales.

n_j = Número de moles del componente j

P = Presión absoluta del sistema.

P_{ci} = Temperatura crítica del componente j (Psia).

NOMENCLATURA.

P_j	=	Presión Ejercida por el componente j
P_{pc}	=	Presión pseudocrítica (Psia).
P_{pr}	=	Presión pseudoreducida.
R	=	Constante de los gases.
S	=	Es la salinidad en porcentaje en peso de sólidos.
T	=	Temperatura absoluta del sistema.
T_{cj}	=	Temperatura crítica del componente j ($^{\circ}R$).
T_{pc}	=	Temperatura pseudocrítica ($^{\circ}R$).
T_{pr}	=	Temperatura pseudoreducida.
V	=	Volumen total del sistema.
V_{fo}	=	volumen de líquidos a una presión P_o y Temperatura T_o .
V_{fp}	=	volumen de líquidos a una presión P y Temperatura T .
V_{go}	=	volumen de gas a una presión P_o y Temperatura T_o .
V_{gp}	=	volumen de gas a una presión P y Temperatura T .
V_j	=	Volumen Ejercido por el componente j
V_{so}	=	volumen de sólidos a una presión P_o y Temperatura T_o .
V_{sp}	=	volumen de sólidos a una presión P y Temperatura T .
V_{Mo}	=	volumen del sistema multicomponente pseudohomogéneo a una presión P_o y temperatura T_o .
V_{Mp}	=	volumen del sistema multicomponente pseudohomogéneo a una presión P y temperatura T .
Y_j	=	Fracción molar de j.
Z	=	Factor de desviación del gas a P y T .
Z_o	=	Factor de desviación del gas a P_o y T_o .
ΔV_{wp}	=	Cambio en volumen de la salmuera, debido a la presión.
ΔV_{wt}	=	Cambio en volumen de la salmuera, debido a la temperatura.
ρ	=	Densidad del gas.
ρ_i	=	Es la densidad del componente o fase i a una presión y Temperatura determinada.
ρ_M	=	Es la densidad del sistema multicomponente pseudohomogéneo a una presión y Temperatura.
ρ_o	=	Es la densidad del aceite a condiciones estándar (lb/STB).

NOMENCLATURA.

ρ_{oy}	=	Es la densidad del aceite a condiciones de yacimiento (lb/bbl).
ρ_w	=	Densidad de la salmuera a condiciones estándar (lb/STft ³).
ρ_{wy}	=	Densidad de la salmuera a condiciones de yacimiento (lb/ft ³).
γ_o	=	Gravedad Específica tomada a presión atmosférica y con temperatura de 60 °F.

CAPÍTULO IV.

E_i	=	Efecto principal o efecto promedio total de la variables "i" sobre el tiempo de vida media de la espuma.
n	=	Número de repeticiones de una medida.
s	=	Desviación estándar muestral (seg).
s^2	=	Varianza Muestral (seg ²).
x_i	=	Muestra de la observación i.
$\bar{x}$	=	Es la media o el promedio aritmético de las observaciones realizadas con un juego idéntico de niveles de las variables.
cv	=	Coefficiente de variación muestral (Fracción)

CAPÍTULO V.

c	=	Concentración de sal en la salmuera (ppm).
Pc	=	Porcentaje de contaminación existente en la salmuera
$Tvmc$	=	Tiempo de vida media de la espuma a cualquier porcentaje en volumen de Contaminación (seg.).
$Tvml$	=	Tiempo de vida media de la espuma limpia (seg.)
$tvm_{10(c)}$	=	Tiempo de vida media a 10% en volumen de contaminación de una salmuera con concentración específica de sal (seg.).
Γ	=	Calidad (porcentaje).

LISTA DE FIGURAS	PÁGINA
Fig. 1.1. Diagrama De Lorenz Para Ilustrar Las Densidades Equivalentes Que Pueden Lograrse Con Diferentes Fluidos, O Mezclas De Ellos.	4
Fig. 1.2. Fase Continua del Fluido.	6
Fig. 1.3. Capacidad de Levantamiento de la Espuma (Adaptado de Beyer et al., 1972)	9
Fig. 1.4. Sistema de Espuma reciclable.	12
Fig. 1.5. Contacto de espumas polihedrales.	14
Fig. 1.6. Redistribución de la presión en las burbujas.	15
Fig. 1.7. Capacidad de Levantamiento de la Espuma (Adaptado de Beyer et al., 1972)	24
Fig. 1.8. Limpieza del Agujero.	26
Fig. 1.9. Mapa de calidad de una espuma (Adaptado de Walton y Gu, 1996)	27
Fig. 1.10. Viscosidad de Fluidos de Fase Variable Vs. Fracción en volumen de Líquido (Adaptado de Lunan, 1996)	32
Fig. 1.11. Efectos de las Propiedades del Fluido sobre el Ritmo de Perforación. (Adaptado de Lunan y Bennion, 1996).	33
Fig. 1.12. Efectos de la Temperatura sobre la Viscosidad de los Fluidos de Perforación.(Adaptado de Lunan y Bennion, 1996).	35
Fig. 1.13. Presión de Fondo Vs. Ritmo de Inyección de Gas (Adaptado de Lunan, 1996).	35
Fig. 1.14. Presión de Inyección Vs. Ritmo de Gas a Varios Gastos de Líquido. (Adaptado de Lunan, 1996)	36
Fig. 1.15. Viscosidad Plástica y Punto de Cedencia de Espumas como Función de la Calidad de la Espuma (Adaptado de Mitchell, 1971)	43
Fig. 1.16. Viscosidad Efectiva De Espumas Como Una Función De La Velocidad De Corte Y La Calidad De Las Espumas (Datos De Mitchell, 1971, Beyer, 1972 Y Sanghani Y Ikoku, 1983).	45
Fig. 1.17. Flujo a través de una boquilla de Barrena (Adaptado de Okpobiri y Ikoku, 1986)	52

Fig. I.18. correlación de Moore para la velocidad de la partícula.	57
Fig. I.19. comparación de Varios Métodos de Predicción de Relaciones de Transporte de recortes. (Adaptado de Bourgoyne et. Al, 1991).	62
Fig. II.1. Tipificación de las Variables Según su Grado de influencia.	70
Fig. II.2. Tipificación de las Variables Involucradas en el Proceso del Lodo Espumado.	71
Fig. II.3. Tipificación de las Variables Involucradas en el Proceso Contaminación de las Espumas.	77
Figura III.1. Relación del factor volumétrico de formación para salmueras en función de la presión del yacimiento.	99
Figura IV.1. Comparación de Promedios contra Promedios para una variable independiente.	111
Figura IV.2. Porcentaje de Control Para Cada juego de Pruebas Seleccionadas.	119
Figura IV.3. Tipos de Interacción Entre las Variables que el análisis Estadístico puede Descubrir.	123
Figura IV.4. Interacción Gráfica entre la Calidad – Concentración de (NaCl) en la Salmuera.	125
Figura IV.5. Interacción Gráfica entre el Porcentaje de Contaminación y la Concentración de (NaCl) en la Salmuera.	127
Figura IV.6. Interacción Gráfica Entre la Calidad de la Espuma – Porcentaje en Volumen de Contaminación con Salmuera con respecto a la variable dependiente.	129
Figura IV.7. Interacción Gráfica de la Calidad con la Variación del Porcentaje de Variación del Tiempo de Vida Media de la Espuma.	131
Figura IV.8. Interacción Gráfica de la Calidad hasta (80 %) con la Variación del Porcentaje de Variación del Tiempo de Vida Media de la Espuma.	131
Figura IV.9. Interacción Gráfica de la Concentración de (NaCl) en la Salmuera con la Variación del Porcentaje de Variación del Tiempo de Vida Media de la Espuma.	132
Figura IV.10. Interacción Gráfica del Porcentaje en Volumen de Contaminación con Salmuera con la Variación del Porcentaje de Variación del Tiempo de Vida Media de la Espuma.	134

Figura IV.11. Interacción Gráfica de la Conjunción de las Tres Variables Independientes con la Variación del Porcentaje de Variación del Tiempo de Vida Media de la Espuma.	135
Fig. V.1. Porcentaje de variación del tiempo de vida media vs. Porcentaje en volumen de contaminación con sal de todas las concentraciones de salmueras, en la espuma con calidad inicial de 55 por ciento.	151
Fig. V.2. Porcentaje de variación del tiempo de vida media vs. Porcentaje en volumen de contaminación con sal de todas las concentraciones de salmueras, en la espuma con calidad inicial de 60 por ciento.	152
Fig. V.3. Porcentaje de variación de la vida media vs. porcentaje de contaminación en volumen de sal para calidad de 90%.	153
Fig. V.4. Porcentaje de variación de la vida media vs. porcentaje de contaminación en volumen de sal (hasta 10%) para calidad de 80%.	154
Fig. V.5. Tiempo de la vida media vs. Porcentaje en volumen de contaminación con salmuera de 130000 ppm de NaCl. A todas las calidades registradas.	155
Fig. V.6. Tiempo de la vida media vs. porcentaje de contaminación en volumen de sal para una salmuera de 160000 (ppm) de NaCl.	159
Fig. V.7. Tiempo de la vida media vs. porcentaje de contaminación en volumen de sal para una salmuera de 130000 (ppm) de NaCl.	159
Fig. V.8. Promedio de Tiempo de la vida media a 10% en volumen de contaminación de sal vs. concentración de NaCl en la salmuera (ppm)	160
Fig. V.9. Tiempo de la vida media vs. porcentaje de contaminación en volumen de sal para una salmuera de 95000 (ppm) de NaCl.	162
Figura V.10. comparación de tiempos de vida media de espuma limpia y Espuma de calidad inicial 60% contaminada con salmuera de 95000 ppm, corregida por calidad.	167
Figura V.11. Comparación de tiempos de vida media de espuma limpia y Espuma de calidad inicial 60% contaminada con salmuera de 130000 ppm, corregida por calidad.	169
Figura V.12. Comparación de tiempos de vida media de espuma limpia y Espuma de calidad inicial 60% contaminada con salmuera de 160000 ppm, corregida por calidad.	171
Figura V.13. Comparación del tiempo de vida media de espuma limpia y espuma de calidad inicial de 60% contaminada con todas las concentraciones de salmuera, corregidas por calidad.	172

Figura V.14. comparación de tiempos de vida media de espuma limpia y Espuma de calidad inicial 90% contaminada con salmuera de 95000 ppm, corregida por calidad. 174

Figura V.15. Comparación de tiempos de vida media de espuma limpia y Espuma de calidad inicial 90% contaminada con salmuera de 130000 ppm, corregida por calidad. 176

Figura V.16. Comparación de tiempos de vida media de espuma limpia y Espuma de calidad inicial 90% contaminada con salmuera de 160000 ppm, corregida por calidad. 178

Figura V.17. Comparación del tiempo de vida media de espuma limpia y espuma de calidad inicial de 90% contaminada con todas las concentraciones de salmuera, corregidas por calidad. 179

LISTA DE TABLAS	PÁGINA
Tabla I.1. Efectos de los Agentes Espumantes	19
Tabla I.2. Inhibidores Químicos.	21
Tabla I.3. Necesidades del sistema para fluidos compresibles.	29
Tabla I.4. Efectos De Los Parámetros Controlables Sobre La Hidráulica De Los Fluidos Espumados.	38
Tabla I.5. Viscosidad plástica y Esfuerzo de Cedencia de espumas (Krug, 1971)	46
Tabla I.6. Propiedades de flujo para espumas (Okpobiri y Ikoku, 1986).	47
Tabla II.1. Componentes Completos del Fluido Espumado de Perforación (BPU).	63
Tabla II.2. Formato de Una Matriz Vester.	66
Tabla II.3. Matriz de Vester que muestra las variables calificadas según su nivel de actividad y pasividad.	68
Tabla II.4. Matriz de Vester que muestra las variables Para contaminación calificadas según su nivel de actividad y pasividad.	76
Tabla II.5. Matriz de Pruebas Para la Contaminación con Aceite Diesel.	80
Tabla II.6. Matriz de Pruebas Para la Contaminación con Salmuera.	81
Tabla II.7. Formato de Captación de Datos Para las Pruebas	81
Tabla II.8. Requerimientos de Materiales para las Pruebas con Aceite.	84
Tabla II.9. Requerimientos de Materiales para las Pruebas con Salmuera.	84
Tabla II.10. Requerimientos de Materiales para las Pruebas Completas.	85
Tabla IV.1. Varianza Muestral de las pruebas con salmuera de concentración de 95000 ppm (NaCl).	115
Tabla IV.2. Desviación Estándar Muestral de las pruebas con salmuera de concentración 95000 ppm (NaCl).	115
Tabla IV.3. Desviación Estándar Muestral de las pruebas con salmuera de concentración de (NaCl) de 95000 ppm.	115
Tabla IV.4. Niveles de las Variables Independientes.	116
Tabla IV.5. matriz de diseño para el análisis factorial.	118
Tabla IV.6. matriz de cálculo para el análisis factorial.	121
Tabla IV.7. Efectos e Interacciones.	122
Tabla IV.8. Promedios para Calidad – Concentración de (NaCl) en la Salmuera.	124
Tabla IV.9. Promedios para Porcentaje de Contaminación – Concentración de (NaCl) en la Salmuera.	126
Tabla IV.10. Promedios para Calidad – Porcentaje en Volumen de Contaminación de la Espuma.	128
Tabla IV.11. Promedio del Porcentaje de Control para Cada Nivel de la Variable Calidad.	130

LISTA DE TABLAS

Tabla IV.12. Promedio del Porcentaje de Control para Cada Nivel de la Variable Concentración de (NaCl) en la Salmuera.	132
Tabla IV.13. Promedio del Porcentaje de Control para Cada Nivel de la Variable Porcentaje en Volumen de Contaminación con Salmuera.	133
Tabla IV.14. Promedio del Porcentaje de Control para Cada Nivel de la Conjunción de las Tres Variables Independientes.	134
Tabla V.1. Materiales utilizados en las pruebas de tiempo de vida media de la espuma.	136
Tabla V.2. composición de la espuma.	137
Tabla V.3. Volúmenes de base líquida y espumante para las diferentes calidades.	138
Tabla V.4. cantidades de sal para preparar las diferentes concentraciones de salmueras.	139
Tabla V.5. Porcentaje de contaminación con salmuera y volumen respectivo.	140
Tabla V.6. Calidad de 55% con salmuera de 95000 ppm	142
Tabla V.7. Calidad de 60% con salmuera de 95000 ppm	143
Tabla V.8. Calidad de 70% con salmuera de 95000 ppm	143
Tabla V.9. Calidad de 80% con salmuera de 95000 ppm	144
Tabla V.10. Calidad de 90% con salmuera de 95000 ppm	144
Tabla V.11. Calidad de 55% con salmuera de 130000 ppm	145
Tabla V.12. Calidad de 60% con salmuera de 130000 ppm	145
Tabla V.13. Calidad de 70% con salmuera de 130000 ppm	146
Tabla V.14. Calidad de 80% con salmuera de 130000 ppm	146
Tabla V.15. Calidad de 90% con salmuera de 130000 ppm	147
Tabla V.16. Calidad de 55% con salmuera de 160000 ppm	147
Tabla V.17. Calidad de 60% con salmuera de 160000 ppm	148
Tabla V.18. Calidad de 70% con salmuera de 160000 ppm	148
Tabla V.19. Calidad de 80% con salmuera de 160000 ppm	149
Tabla V.20. Calidad de 90% con salmuera de 160000 ppm	149
Tabla V.21. Diferenciales entre los promedios de tiempo de vida media para muestras limpias.	156
Tabla V.22. Comparación entre tiempos de vida medios calculados y medidos para espumas limpias entre 55 – 80% de calidad.	157
Tabla V.23. Comparación entre tiempos de vida medios calculados y medidos para espumas limpias entre 80 – 90% de calidad.	158

LISTA DE TABLAS

Tabla V.24. Comparación entre tiempos de vida medios calculados y medidos a 10% de contaminación en volumen para las diferentes salmueras.	161
Tabla V.25. Comparación entre tiempos de vida medios calculados y medidos para espumas de 60% de calidad a diferentes concentraciones de contaminante (salmuera de 95000 ppm).	164
Tabla V.26. Corrección de la calidad debido a la contaminación con salmuera de 95000 ppm, para una espuma de calidad inicial de 55 %.	165
Tabla V.27. Corrección de la calidad debido a la contaminación con salmuera de 95000 ppm, para una espuma de calidad inicial de 60 %.	166
Tabla V.28. Corrección y comparación de la calidad debido a la contaminación con salmuera de 95000 ppm, para una espuma de calidad inicial de 60 %.	166
Tabla V.29. Corrección de la calidad debido a la contaminación con salmuera de 130000 ppm, para una espuma de calidad inicial de 60 %.	168
Tabla V.30. Corrección y comparación de la calidad debido a la contaminación con salmuera de 130000 ppm, para una espuma de calidad inicial de 60 %.	168
Tabla V.31. Corrección de la calidad debido a la contaminación con salmuera de 160000 ppm, para una espuma de calidad inicial de 60 %.	170
Tabla V.32. Corrección y comparación de la calidad debido a la contaminación con salmuera de 160000 ppm, para una espuma de calidad inicial de 60 %.	170
Tabla V.33. Corrección de la calidad debido a la contaminación con salmuera de 95000 ppm, para una espuma de calidad inicial de 90 %.	173
Tabla V.34. Corrección y comparación de la calidad debido a la contaminación con salmuera de 95000 ppm, para una espuma de calidad inicial de 90 %.	173
Tabla V.35. Corrección de la calidad debido a la contaminación con salmuera de 130000 ppm, para una espuma de calidad inicial de 90 %.	175
Tabla V.36. Corrección y comparación de la calidad debido a la contaminación con salmuera de 130000 ppm, para una espuma de calidad inicial de 90 %.	175
Tabla V.37. Corrección de la calidad debido a la contaminación con salmuera de 160000 ppm, para una espuma de calidad inicial de 90 %.	177
Tabla V.38. Corrección y comparación de la calidad debido a la contaminación con salmuera de 160000 ppm, para una espuma de calidad inicial de 90 %.	177

RESUMEN

En la presente tesis, se desarrollaron pruebas para determinar el comportamiento del fluido espumado de perforación (BPU) bajo la influencia de contaminantes de diferentes tipos, para esto, como primera medida se implementó una herramienta teórica y cualitativa denominada "Matriz de Vester" con el objeto de precisar las variables dentro de las operaciones con espumas, que influyen de manera más crítica sobre todo el sistema y con base en esto, se desarrolló una serie de pruebas experimentales en el laboratorio de fluidos de perforación de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, tendientes a precisar la influencia sobre el tiempo de vida media de la espuma (patrón de referencia para la estabilidad de la misma) de cuatro factores específicos que juegan un papel importante en la misma, estos son: La calidad de la espuma, la concentración de sal (NaCl) en la salmuera contaminante, el porcentaje en volumen de contaminación de las diferentes salmueras y la contaminación con aceite Diesel.

Con estas pruebas experimentales, se desarrolló un análisis estadístico factorial fraccionado a dos niveles, como primera medida para observar las interacciones de las variables independientes sobre la variable dependiente, con base en los resultados encontrados en dicho análisis y los datos aportados por las pruebas, se desarrolló un modelo matemático empírico para la determinación del tiempo de vida media de la espuma manejando los tres primeros parámetros, ya que las pruebas desarrolladas con aceite diesel, arrojaron que la espuma no tolera ningún tipo de concentración de aceite, segregándose éste inmediatamente cuando se agrega a la espuma (factor que se tuvo en cuenta en el análisis estadístico).

Paralelo a lo anterior, se plantea una metodología teórica para la determinación de la densidad y la viscosidad de la espuma contaminada, teniendo en cuenta, contaminantes tanto miscibles como inmiscibles (aceite).

Por último, se hacen varias observaciones y sugerencias para poder continuar con el desarrollo del tema que trata esta tesis, el cual, es el modelamiento de las espumas de perforación, en presencia de contaminantes sólidos y líquidos.

INTRODUCCIÓN.

El presente trabajo de investigación pretende complementar la determinación y caracterización del comportamiento físico y reológico del **Fluido Espumado de Perforación (BPU)** diseñado y producido en la región sur de perforación y mantenimiento de pozos de PEMEX EXPLORACIÓN Y PRODUCCIÓN, realizando para ello, diferentes pruebas con la espuma sometida a varios contaminantes de diferentes tipos, entre los que se podrán contar, residuos sólidos de perforación, diferentes tipos de aceites y varios contenidos de agua, sometiéndolo a diferentes pruebas diseñadas para ello.

La espuma denominada **(BPU)** es un desarrollo empírico basado en la experiencia adquirida a través de los años por el técnico **Bonifacio Pung Uzcanga**. Dando diversos resultados en varias pruebas realizadas en operaciones de campo, de allí crece la necesidad de dar una caracterización completa de sus propiedades y las características para su utilización, tarea que se aborda en un esfuerzo por promocionar el talento mexicano y optimizar el funcionamiento de la misma como alternativa para las operaciones de perforación y reparación que se desarrollan en México.

El desarrollo de este trabajo, contó con el apoyo experimental del laboratorio de fluidos de perforación de la Universidad Nacional Autónoma de México y toda la logística que esta universidad posee. Se contemplarán experiencias desarrolladas anteriormente en pruebas y aparatos similares.

El análisis de los datos obtenidos, se basarán en caracterizaciones de tipo estadístico, para comprobar la confiabilidad de las pruebas y para dar una buena aproximación a los resultados esperados, así como, se basará en la teoría de espumas desarrollada hasta el momento en la literatura técnica.

INTRODUCCIÓN

Las pruebas realizadas tuvieron como principales variables, el contenido y concentración de contaminantes, porcentajes de mezcla de la espuma (calidad de la espuma), desarrollándose toda una gama de pruebas que nos provean los datos necesarios para la óptima caracterización de esta espuma (**BPU**).

Por último, y con base en los resultados obtenidos, se desarrolla toda una serie de conclusiones y recomendaciones que puedan contribuir a la buena utilización de este fluido en las operaciones antes mencionadas, y también dar una ventana de oportunidad en otros posibles usos.

INTRODUCCIÓN

OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN:

- 1.** Realizar una serie de experimentos para observar la estabilidad del fluido espumado de perforación (**BPU**), observando la influencia de diferentes tipos de contaminantes.
- 2.** Recopilar procedimientos teóricos para el cálculo de las propiedades físicas densidad y viscosidad en las espumas, teniendo en cuenta la influencia de contaminantes sólidos y líquidos.
- 3.** Identificar el tipo de operaciones apropiadas para su uso, con base en su respuesta a contaminantes sólidos y líquidos.
- 4.** Proveer el sustento teórico para la implementación de este fluido espumado de perforación, como producto de desarrollo totalmente mexicano.

JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN:

El desarrollo del presente trabajo se sustenta académicamente en la necesidad de Proporcionar un modelamiento matemático y científico a la operación y comportamiento del Fluido Espumado de Perforación (BPU), con el fin de tener un acercamiento teórico óptimo a la forma en que este tipo de fluido de perforación se comporta en la práctica y así tener una forma de predecir su comportamiento con antelación para su uso en las operaciones de campo.

La contribución técnica viene dada en la medida que la caracterización de este fluido se dé, las operaciones con el mismo podrán efectuarse de manera más segura y eficiente, dándose un avance importante en la elaboración del cronograma de trabajo y en la operación del mismo, minimizando el riesgo que conlleva el operar con herramientas y productos de los cuales no se tiene una certeza en su comportamiento.

Otra contribución que tiene el presente trabajo es que al desarrollarse esta caracterización, se abren las puertas para que este producto sea comercializado incluso internacionalmente, con los beneficios que esto representaría a la empresa petrolera estatal mexicana PEMEX y a su creador el técnico Bonifacio Pung Uzcanga. Contribuyendo al engrandecimiento de la ciencia que se fomenta en instituciones como la UNAM.

CAPÍTULO I.

MARCO TEÓRICO

I.- MARCO TEÓRICO

I. - MARCO TEÓRICO.

En este primer capítulo, se harán las precisiones conceptuales que se tendrán para el desarrollo de este trabajo, así como un vistazo general a las teorías que sobre el tema se han desarrollado hasta el momento.

I.1 DEFINICIÓN DE TÉRMINOS:

El tipo de fluido que se pretende caracterizar, hace parte de una de las técnicas para la perforación bajo-balance, por lo que se empezará definiendo en este caso, en forma general lo que significa esta técnica:

I.1.1. Perforación convencional o sobre-balance:

En esta técnica, la presión de los fluidos de perforación previenen que los fluidos de la formación entren o fluyan dentro del pozo durante la operación, manteniendo su presión por encima de la presión de los fluidos en los poros de la formación. Esto hace que algo del fluido de perforación fluya dentro de las rocas alrededor del agujero, provocando que materiales del mismo, se adhieran a las paredes del pozo, para restringir la permeabilidad y restringir el flujo de los fluidos de la formación.

I.1.2. Perforación bajo-balance:

En estas operaciones, la presión del fluido de perforación en el agujero, es intencionalmente mantenida por debajo de la presión del fluido en los poros de la formación, dentro de la sección abierta del pozo. Dando como resultado, que los fluidos de

I.- MARCO TEÓRICO

la formación fluyan dentro del pozo cuando una formación permeable es penetrada. Por esta razón algunas veces, la operación de bajo-balance es llamada **"Perforación fluyendo"**.

Este tipo de perforación, ofrece grandes beneficios sobre la técnica convencional de perforación, estos incluyen:

- ✓ Incremento en la tasa de penetración y vida de la barrena.
- ✓ Reducción de la probabilidad de pegaduras en el fondo de la sarta de perforación.
- ✓ Minimizar la pérdida de circulación mientras se perfora.
- ✓ Mejorar la evaluación de la formación.
- ✓ Incrementar la productividad del pozo.
- ✓ Las necesidades de tratamientos de estimulaciones primarias pueden ser reducidos o eliminados.

1.1.3. Técnicas de perforación bajo-balance:

Varias técnicas están disponibles para alcanzar intencionalmente las condiciones de Bajo-Balance. Estas, involucran fluidos de perforación con un gradiente de presión hidrostática en el pozo menor que el gradiente de presión de poro.

Los fluidos de perforación pueden ser de una fase, sea líquida o gas, o de dos fases, como mezcla de gas-líquido. Cuando se tiene una fracción volumétrica significativa de gas (inyectado o producido), el fluido de perforación podría ser compresible.

La perforación Bajo-Balance, no necesariamente requiere el uso de fluidos de perforación compresibles. Un fluido líquido convencional, puede dar condiciones de Bajo-Balance en formaciones anormales o sobre presionadas, si la presión de circulación (suma de la cabeza hidrostática y las caídas de presión friccional en el final de la línea de regreso del fluido) es menor que la presión de poro. Usar un fluido de perforación con una densidad menor que el gradiente de presión del yacimiento, no garantiza las condiciones Bajo-Balance. Particularmente con fluidos espumados, ya que la caída de presión friccional pueden ser sustancialmente alta, Esto puede resultar en una presión de circulación en el

I.- MARCO TEÓRICO

pozo que exceda la presión de poro, aún cuando la cabeza hidrostática del fluido de perforación no lo haga.

Los fluidos para la perforación Bajo-Balance, incluye básicamente:

✓ *Fluidos de perforación gaseosos:*

Que incluyen entre otros, gases inertes, como aire o Nitrógeno (principalmente, ya que los demás gases inertes, son más costosos) o como el gas natural.

✓ *Fluidos de perforación de dos fases:*

Mezclas de fases gaseosas y líquidas, llamados comúnmente "*Fluidos de perforación aligerados*". Clasificados como Niebla, Espuma o Líquidos Aireados, de acuerdo con la estructura y los volúmenes relativos de las fases líquidas y gaseosas.

✓ *Fluidos de perforación líquidos:*

La presión del fluido de los poros de la formación usualmente excede la presión hidrostática de agua fresca o salada a la misma profundidad. En este escenario, es posible la perforación de Bajo-Balance usando líquidos.

Según la clasificación anteriormente expuesta, el tipo de fluido que se tratará en este trabajo será un fluido de perforación de dos fases tipo espuma, por lo tanto, la caracterización de esta se hará a continuación:

I.2.- PERFORACIÓN CON ESPUMAS:

I.2.1.- INTRODUCCIÓN:

La perforación con espumas se volvió popular a mediados de la década de 1960 y primeros años de la década de 1970. La espuma fue empleada para manipular el influjo de varios líquidos de formación, tales como agua o aceite, que pueden ser manejados como aire, gas o niebla. Levantan mejor los recortes que otros fluidos. Y se encuentra entre la niebla y los fluidos aireados con un espectro de fluido multifásico, como se muestra en la figura I.1.

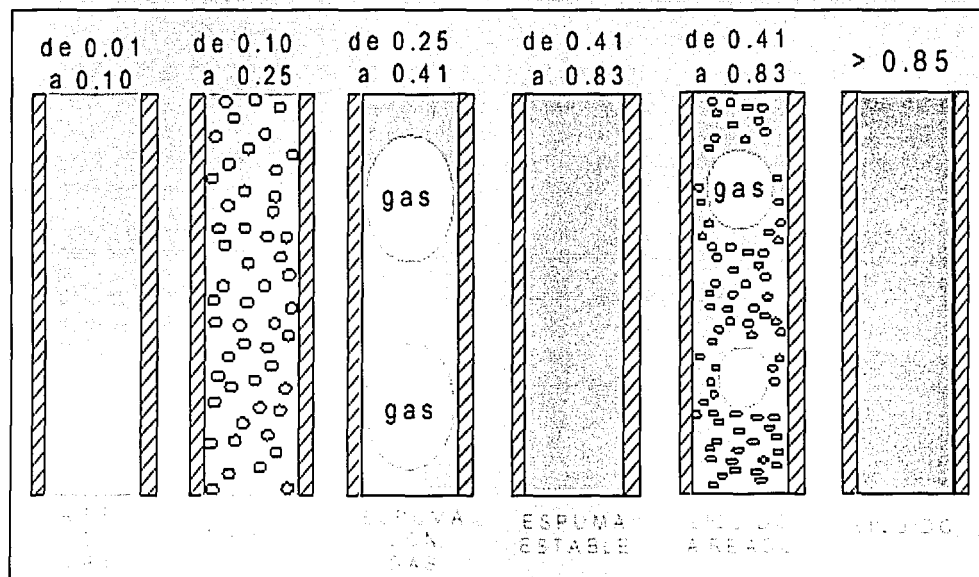


Fig. I.1. Diagrama de Lorenz para ilustrar las densidades equivalentes que pueden lograrse con diferentes fluidos, o mezclas de ellos.

I.- MARCO TEÓRICO

La fase líquida de un fluido espumado, contiene algunos tipos de surfactantes o agentes espumantes. Los espumantes ayudan a mantener el fluido junto y previene que la fase gaseosa se separe del sistema del fluido. El uso de un agente químico espumante es el rasgo más diferenciador de las espumas.

Las espumas, además pueden ser subdivididas entre espumas estables y espumas rígidas.

La espuma estable, es la más versátil de las técnicas de los fluidos de dos fases. El líquido es la fase continua y contiene burbujas de aire encapsuladas dentro de él. Es similar a una espuma de afeitar. El porcentaje de líquido podría variar entre dos por ciento (2%) y quince por ciento (15%) en volumen. Es producida con 1 o 2% de agente espumante por volumen adicionado a la fase líquida del fluido. Esto es como 10 veces la cantidad de agente espumante usado para generar un sistema de niebla. Una válvula de contra presión anular es usada cuando, con una variación de la fracción de líquido, permite un gradiente de presión de fondo variable de entre 0.026 (psi/ft) (0.5 ppg) y 0.312 (psi/ft) (6.0 ppg). La capacidad de levantamiento o acarreo de las espumas estables, es superior a la de los lodos de perforación y esto hace posible desplazar fluidos utilizando espumas.

La espuma Rígida incorpora ligeramente menos agente espumante que la espuma estable (solo aproximadamente 1%). Puede incluir 3 o 4% de Bentonita o Gel en la mezcla, también como una pequeña cantidad de algún polímero viscosificante de largas cadenas (menos de 0.2%).

Las ventajas de las espumas son similares para la perforación con aire o niebla, que son:

- ✓ La tasa de penetración puede ser incrementada en un factor de cinco (5) o más.
- ✓ El daño a la formación debido a la hidrostática, sólidos o reacciones químicas, es eliminado.
- ✓ Las pérdidas de circulación son eliminadas.
- ✓ El costo del sistema de lodo alternativo es cubierto, el cual compensa el costo del equipo de perforación con niebla y personal.
- ✓ La vida de la barrena puede extenderse debido a la poca erosión y daño de los sellos por los sólidos del lodo.

I.- MARCO TEÓRICO

- ✓ El pozo es continuamente probado en zonas de gas, mientras se perfora.

Los influjos de aceite y agua salada, usualmente destruyen la estabilidad de la espuma, restringiéndose su uso en estas condiciones.

El término "**Espumas**" es usado usualmente para describir un fluido de perforación que es actualmente una construcción de niebla utilizando productos espumantes. Es importante distinguir entre las dos por que la reología y la hidráulica de la espuma y la niebla, son totalmente diferentes.

I.2.1.1. Fase continua:

La figura I.2 muestra que la principal diferencia entre la espuma y la niebla se encuentra en la fase continua. La espuma es definida mas estrictamente como un fluido de dos fases, teniendo al líquido como la fase continua, con una fase gaseosa suspendida en burbujas. Niebla, por otra parte es un fluido de dos fases con la fase gas como fase continua. La fase líquida en la niebla, es suspendida en gotas dentro de la fase gaseosa.

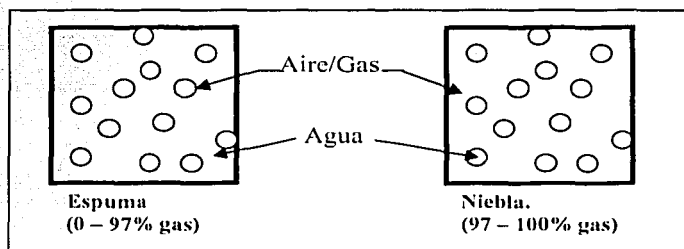


Fig.I.2. Fase continua del fluido.

Estos dos fluidos se comportan muy diferente en cuanto a la reología, capacidad de acarreo, fricción y presión hidrostática. Las matemáticas que describen la hidráulica de los dos fluidos son diferentes.

I.- MARCO TEÓRICO

El punto preciso donde el cambio ocurre de niebla a espuma ha sido una fuente de debate, pero se puede decir que este punto de intercambio, está relacionado mas rápida y directamente a la calidad de la espuma.

I.2.1.2. Calidad de la espuma:

La calidad de la espuma es definida como el porcentaje en volumen dentro de un fluido de dos fases ocupado por la fase gaseosa. La calidad de la espuma, puede ser expresada como un decimal o como su porcentaje equivalente. Por ejemplo, una espuma de calidad de 60 o 0.60 puede describir un fluido de dos fases compuesto por 60% de gas y 40% de líquido (estos porcentajes dados en volumen).

Varios investigadores han demostrado que la calidad de la espuma en el punto de cambio, puede tener un rango entre 0.94 hasta 0.97. Un fluido de dos fases podría comportarse como una espuma en calidades menores a este rango, y podría comportarse como niebla, cuando la calidad de la espuma está sobre dicho rango. El punto exacto, donde el fluido da la transición de espuma a niebla, o viceversa, depende de las propiedades físicas de los componentes líquidos y gaseosos que conforman la mezcla.

Las espumas, como cualquier otro fluido multifásico, al incrementar la presión, causa que el volumen de la fase gas decrezca mientras que la fase líquida se mantiene constante. La calidad de la espuma de cualquier fluido, puede ser dramáticamente diferente en el fondo del pozo que el que se tiene en condiciones de superficie.

Las variaciones en la calidad de la espuma, causan cambios en la reología del fluido y su desarrollo hidráulico. Las espumas y los fluidos aireados, con calidades superiores a 0.55, se comportan similares reológicamente, sin embargo, en cualquier momento que la calidad de la espuma caiga bajo los 0.55, la espuma tiende a romperse. A muy bajas calidades de espumas (por ejemplo, en ambientes de alta presión en el fondo del pozo), el fluido podría comportarse más como un líquido puro.

I.- MARCO TEÓRICO

I.2.1.3. Beneficios de usar espumas:

En la década de 1960 y principios de los 1970s, las espumas fueron introducidas en la industria del petróleo y gas, como un fluido de perforación capaz de superar problemas encontrados con aire o niebla. Las espumas se reconocen, por tener una gran capacidad de levante, más que los fluidos de aire o niebla. Las espumas, son, por tanto, capaces de remover mas cantidad de fluidos que entran al pozo. Pueden acarrear más cantidad de recortes desde el pozo, por que las espumas dependen más de la viscosidad que de la velocidad de limpieza del agujero. Comparado con la niebla, la espuma requiere mucho menos potencia.

A.- Entrada de fluidos:

La entrada de fluido, es siempre un problema cuando se perfora con aire. Pequeñas cantidades o ritmos de entrada, puede causar que los recortes se peguen y formen anillos de lodo, esto puede ser controlado con la adición de más agua para mojar completamente los recortes y prevenir los agrupamientos. Esto es al menos parte del comportamiento de la perforación con niebla.

Grandes volúmenes o altos ritmos de entrada de fluidos, encontrados mientras se perfora con aire causa problemas con la limpieza del agujero y pérdidas de circulación. El volumen de aire que está siendo inyectado, puede ser incrementado para poder levantar más cantidades de fluido que entra al pozo. Pero un incremento en el ritmo de inyección del gas, causa un incremento en la presión de inyección. Eventualmente, al incrementar un ritmo de entrada, el límite de inyección podría ser alcanzado.

La solución más común a este problema es meter lodo al pozo, controlar la entrada de fluido y continuar perforando. Esto, disminuye el ritmo de penetración e impone condiciones de sobre balance en la formación.

Los fluidos espumados, pueden levantar grandes cantidades de fluido que estén entrando al pozo y sacarlo del mismo mucho más eficientemente que el gas puro o la niebla.

I.- MARCO TEÓRICO

Grandes cantidades de espuma, permiten manejar grandes cantidades de fluido de perforación entrando al pozo, especialmente agua. Si los fluidos que están entrando son hidrocarburos o agua salada, debe tenerse mucho cuidado en el diseño de los químicos usados para generar la espuma y prevenir el colapso.

B.- remoción de recortes:

Como se muestra en la figura (I.3), las espumas tienen mucho mejor capacidad de levantamiento de recortes que el aire o la niebla.

La viscosidad y capacidad de levantamiento incrementa cuando la fracción de líquido decrementa, hasta que la espuma se vuelve inestable a fracciones de líquido de 0.02 a 0.03 en fracción, a estas fracciones de líquido, la espuma se convierte en inestable y fluye intermitentemente como flujo tapón de espuma y gas. Y la capacidad de levantamiento disminuye considerablemente.

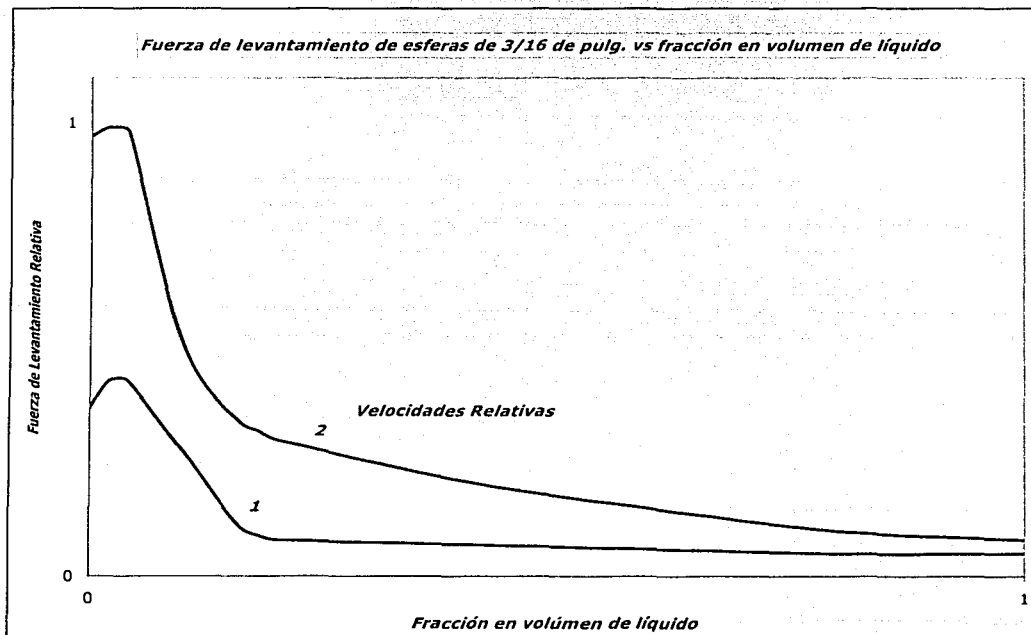


Fig. I.3. Capacidad de levantamiento de la espuma (adaptado de Beyer et al., 1972)

I.- MARCO TEÓRICO

En la figura anterior, se muestra descriptivamente, la influencia que tiene la fracción en volumen de líquido y la velocidad relativa de la espuma en la capacidad de levantamiento de la misma. Las curvas 1 y 2 especifican dos velocidades relativas diferentes de la espuma.

La eficiente aplicación de las espumas en áreas que se caracterizan por una gran cantidad de fluidos que entran en la formación, ha incrementado su uso desde los primeros años de 1970s. Sin embargo, su uso ha declinado debido a lo concerniente a costos del sistema necesario para esta.

Con la combinación de alta viscosidad y baja densidad, los fluidos de perforación espumados, pueden proveer otros beneficios para la operación de perforación.

- ✓ La alta viscosidad permite un eficiente transporte de recortes, a una velocidad anular que es mucho más baja que la requerida por el aire seco o por la perforación con niebla. El ritmo de inyección del gas para la perforación con espumas puede ser mucho menor que el necesario para el gas seco o la niebla de perforación.
- ✓ La baja densidad de las espumas, permite condiciones de bajo balance en casi todas las circunstancias. Las presiones de fondo con la espuma, tienen a ser más altas que con aire o niebla. Esto puede reducir el ritmo de penetración por abajo del normalmente encontrado para gas seco, sin embargo, los ritmos de penetración con espumas, son considerablemente altos en comparación con un lodo normal de perforación.
- ✓ Las altas presiones anulares con las espumas, pueden ser potencialmente reductoras de los problemas de inestabilidad mecánica del pozo, problema que se encuentra con gas seco o niebla. Al mismo tiempo, las bajas velocidades anulares, reducen la posibilidad de erosión en las paredes de la formación o en la sarta de perforación.

I.- MARCO TEÓRICO

I.2.1.4. Limitaciones de las espumas:

A.- Altos costos:

Cuando la espuma regresa a la superficie a través de la línea de matar, esta es normalmente descargada a la piscina de reserva para permitir que el gas escape y la espuma se colapse. La fase líquida de la espuma es luego desechada. Por que toda la espuma inyectada abajo del pozo, debe ser generada usando líquidos nuevos y por que el líquido no es típicamente agua, el costo del fluido espumado puede ser alto.

B.- Cálculos hidráulicos:

Adicionalmente, los cálculos que involucran la aplicación de fluidos multifásicos compresibles son muy difíciles y tediosos cuando son manejados manualmente. Los modelos computacionales diseñados para estos cálculos fueron originalmente programas en grandes aparatos con una disponibilidad limitada. La carencia de un buen modelo hidráulico, de uso fácil, basado en computadoras personales, ha limitado el uso de fluidos espumados.

C.- Aspectos ambientales:

Finalmente, los aspectos sobre los efectos ambientales de los primeros surfactantes de espumas, han sido una restricción para el uso de espumas como fluidos de perforación. Las espumas, sin embargo, han seguido siendo fluidos populares para trabajos de reparación y limpieza de pozos, debido a su superior capacidad de levantamiento.

I.2.1.5. Renovado interés en las espumas:

En años recientes, el uso de espumas como fluido de perforación ha ido en aumento. Debido a surfactantes más sofisticados, otros químicos espumantes y un acercamiento tecnológico renovado en su uso. El número de unidades de espumas disponibles, ha aumentado conforme ha aumentado la demanda de los mismos.

I.- MARCO TEÓRICO

Un nuevo acercamiento tecnológico que ha incrementado el interés mundial por las espumas de perforación, es la introducción de las espumas reciclables. En 1994, Clearwater, Inc. Patentó en los Estados unidos un proceso de reciclado para productos espumantes. Este proceso es ilustrado en la figura (I.4)

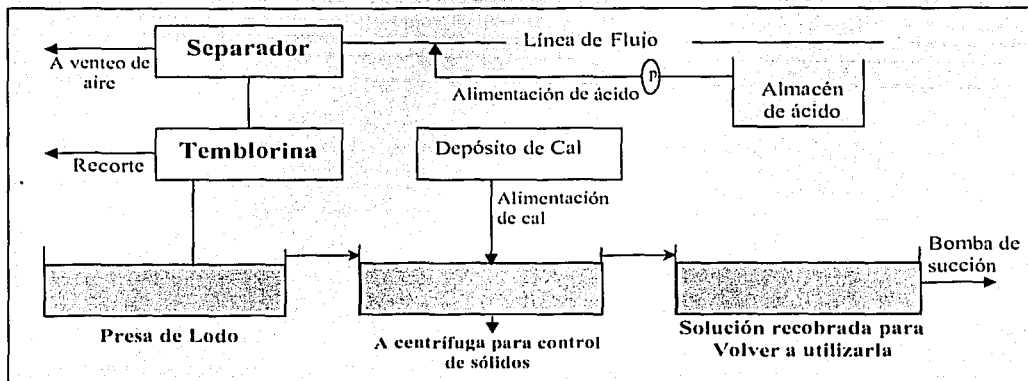


Fig. I.4. Sistema de espuma reciclable.

El ácido es adicionado a la espuma en la línea de matar. Este ácido actúa como un rompedor de la tensión superficial en la fase líquida de la espuma. Esto libera la fase gas (aire). El cual es venteado.

La fase líquida es tomada entonces, como un sistema convencional de fluidos de perforación. Después de pasar a través del separador para remover el aire, el fluido remanente es pasado a través de un equipo convencional de control de sólidos para remover los recortes que se hallan acarreado a la superficie por la espuma.

La fase líquida limpia es tratada con cal o cáustica, para incrementar el pH a sus niveles básicos. Este líquido, puede ser usado luego para reconstituir una espuma con la introducción de aire o gas. De esta forma, el líquido no es completamente repuesto en cada circulación del fluido. Aproximadamente hay un 10% de pérdida durante el proceso.

I.- MARCO TEÓRICO

El costo químico ha sido un poco menos del 10% del costo normalmente asociado con las operaciones de perforación con espumas.

I.2.2.- QUÍMICA BÁSICA DE LAS ESPUMAS:

I.2.2.1. Estructura de las espumas:

Como se ha descrito anteriormente, la espuma es formada cuando el aire u otro gas es introducido bajo la superficie de un líquido que se expande para encerrar al gas con una película de líquido. Todas las teorías de la formación de las espumas y su estabilización, requieren de un segundo material presente en el sistema, otro aparte del líquido a ser espumado. Esta sustancia es usualmente un soluto de superficie activo (surfactante), pero puede ser también otro líquido. Esta es la diferencia fundamental entre la generación de una espuma y la simple aireación de un líquido.

Las espumas son usualmente clasificadas de acuerdo a las formas de sus burbujas. En una espuma generada recientemente o una que contiene muy pequeñas burbujas, las burbujas son esféricas. Estas son llamadas *espumas esféricas*. Recíprocamente las *espumas polihedrales* contienen burbujas de dichas formas, algunos autores sostienen que las espumas polihedrales son las referencias típicas de una verdadera espuma. Generalmente las espumas esféricas tienen más alta fracción en volumen de líquido que las espumas polihedrales. Las esferas sin distorsionar no se empaquetan tan cercanamente como lo hace la polihedral y la fase líquida entre las burbujas esféricas debe ser más gruesa que la que hay entre las burbujas polihedrales.

En espumas reales, cuando tres burbujas de igual tamaño se encuentran juntas, estas forman tres ángulos de 120° en sus puntos de contacto (figura I.5) éstas películas comunes tienden a perder sus curvaturas y se transforman en planas, formando un borde plano entre sus bordes individuales.

1.- MARCO TEÓRICO

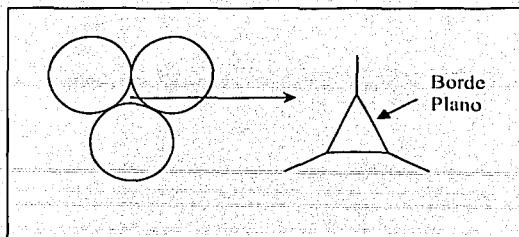


Fig. 1.5. *Contacto de espumas polihedrales.*

En una espuma polihedral ideal, consistente en burbujas de igual tamaño, las burbujas podrían ser dodecaedros pentagonales que tienen doce lados, con cada lado consistiendo en un pentágono. Con esta forma sería posible alcanzar un empaquetamiento perfecto minimizando el volumen de la fase líquida requerida para formar la película entre las burbujas. Sin embargo, en la práctica, las espumas no se comportan idealmente y contienen burbujas de diferentes volúmenes y tamaños.

1.2.2.2. Dinámica de las espumas:

Las espumas son inherentemente un sistema inestable, constantemente sujeto a tres factores de rompimiento:

- ✓ Redistribución del tamaño de las burbujas.
- ✓ Adelgazamiento de las paredes de las burbujas.
- ✓ Ruptura de la película de las paredes.

Redistribución del tamaño de las burbujas:

Ocurre cuando la presión interna depende de la curvatura de las paredes de las burbujas. Cuando una burbuja grande y pequeña se juntan, la pequeña burbuja siempre penetra las paredes de la burbuja grande. Un trabajo extensivo realizado por Laplace y Plateau demostraron que en el pequeño radio de curvatura, hace más alta la presión dentro de la

1.- MARCO TEÓRICO

burbuja. Siendo una burbuja pequeña, tiene mayor radio de curvatura y tiene mayor presión interna. Esto es mostrado en la figura (I.6)

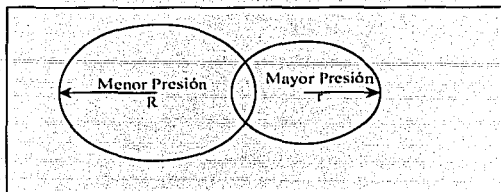


Fig. I.6. Redistribución de la presión en las burbujas.

Estas dos burbujas podrían mantenerse en sus estados individuales si no fuera por el hecho de que la película común a ambas es permeada por la fase gas interna. El gas eventualmente se difunde desde la burbuja pequeña (de alta presión interna) a la burbuja grande (de baja presión interna). Esta movilidad causa que la pequeña burbuja, se transforme en una aún más pequeña, mientras que la burbuja grande incrementa su tamaño. Esta migración produce burbujas de mayor cantidad de gas, las cuales son más fáciles de romper.

El adelgazamiento de las paredes de las burbujas:

Es una consecuencia del drenaje y evaporación. El drenaje del fluido puede ser fácilmente medido, generando espuma en un cilindro y registrando el volumen de líquido que se asienta en el fondo como una función del tiempo. Esto define el tiempo de vida media de la espuma.

Este tipo de drenaje es debido a la gravedad; sin embargo, las espumas podrían drenar también, incluso si no estuvieran las fuerzas de gravedad presentes; las figura (I.5) muestra que los puntos de intersección de dos burbujas, donde existe una pared común entre las dos burbujas, son planas. La curvatura es la misma a ambos lados de la pared, y por lo tanto, la presión en el líquido que está formando las paredes es la misma que en las burbujas.

I.- MARCO TEÓRICO

En la interfase Aire / líquido, la película es cóncava hacia la fase aire. Esto causa que el líquido tenga una presión capilar negativa, la cual conduce a éste dentro de la pared a las intersecciones, que se conoce como "*Bordes planos*". Esto causa que las paredes se adelgacen hasta su ruptura, formando una gran burbuja.

Ruptura de las paredes de la película:

Esta ruptura en las burbujas es causada por la disminución del área superficial, la cual conduce a un cambio sustancial en la superficie, liberando energía. Una burbuja de un centímetro de radio y 0.001 centímetro de espesor de pared tiene un área superficial de aproximadamente 25 cm² (por ambos lados). Si esta burbuja se transforma en una gota de líquido (si la burbuja estallara), la superficie de esta gota sería de aproximadamente 0.2 cm². La diferencia de energía entre burbuja y gota es muy grande, tanto que la película de la burbuja es penetrada con una fuerza sustancialmente alta. La formación de gotas del líquido desde las burbujas, ha sido registrado a velocidades de 30 pies por segundo (20 millas por hora).

I.2.2.3. Estabilización y preservación de espumas:

Siendo las espumas un sistema inherentemente inestable, la preservación de las mismas, por estabilizadores temporales es crítico para el comportamiento de ellas como fluido de perforación. Una considerable cantidad de pruebas de laboratorio y evaluaciones de campo han sido realizadas para evaluar los métodos desarrollados para extender la vida efectiva de una espuma dada.

En líquidos puros, el drenaje sobre los bordes planos, causa un adelgazamiento y eventual ruptura en las paredes de las burbujas, sin embargo, si un surfactante (espumador) está presente, el drenaje puede ser sustancialmente retardado. Esto extiende la vida efectiva de la espuma dada. Cuatro mecanismos para retardar el drenaje del líquido en una burbuja han sido identificados. Estos serían:

I.- MARCO TEÓRICO

- ✓ Incrementar la viscosidad de la superficie de la burbuja retarda el drenaje del líquido en los bordes. El incremento del tiempo de retardado del drenaje, retarda la recolección de fluidos en los bordes planos.
- ✓ Crear una burbuja de pared gruesa con aditivos que reaccionen con oxígeno en la interfase Aire / líquido reduce la tendencia de ruptura de las paredes, algunas proteínas proveen este beneficio.
- ✓ Reponiendo el espesor de la película de la burbuja por transporte superficial, incrementa la vida efectiva de la espuma. La superficie de una película de burbuja, podría fluir de una región de baja tensión a otra de alta tensión superficial. Cuando una porción de la superficie de la película es estirada, una región de alta tensión superficial es producida donde la concentración de surfactante está disminuida con relación a la concentración del solvente (agua). Esta es el área con el más alto potencial para la ruptura de las paredes. Algunos surfactantes podrían migrar al área de alta tensión, llevando solvente con ellos y restaurando el grosor original de la película y la integridad de la burbuja.
- ✓ El cuarto mecanismo de estabilización de las espumas es de carácter eléctrico. Cuando un material activo es sumado a la superficie, la espuma es cargada ionicamente, la película formada, concentrará en una capa, grandes cadenas de iones, conteniendo una solución con exceso de iones. La repulsión electrostática de las cargas iguales en las paredes, previene su mutuo acercamiento, entonces, la película no puede transformarse en más delgada para que provoque el estallido repentino.

Usando estas técnicas retardadoras del drenaje, ha aumentado las aplicaciones del sistema de perforación con espumas

I.2.2.4. Química de las espumas:

El avance en los químicos usados, han permitido usar el sistema de espumas con resultados exitosos a profundidades que exceden los 25000 pies (mayor a 7600 metros) con temperaturas que alcanzan los 425 °F. Los aditivos para la estabilización del agujero, ha permitido perforar formaciones más sensibles, la adición de aditivos anticorrosivos, ha reducido el ritmo de corrosión a los rangos obtenidos permisibles para operar sin preocupaciones.

Los químicos comúnmente usados en los sistemas de perforación con espumas, caen en uno de las cuatro clases existentes. Estas son: los agentes espumantes, los inhibidores de corrosión, polímeros y estabilizadores de arcillas y lutitas.

I.2.2.5. Agentes espumantes:

Los agentes espumantes son usados en las aplicaciones con aire, niebla, espumas estables y espumas gruesas, mientras que los mecanismos varían ligeramente con cada técnica de bajo balance, la función primaria de estos agentes espumantes, es procurar que las burbujas de la fase gaseosa se mezclen dentro de la fase líquida, manteniendo a la fase líquida como medio continuo. La selección del agente espumante apropiado, es fundamental para el éxito de la operación de perforación, las consideraciones que deben tenerse son la concentración, la contaminación, temperatura y solubilidad.

La concentración del agente espumante es usada para ajustar la estabilidad de la espuma, un incremento en la concentración incrementa la vida media de la misma. El mecanismo por el cual esto ocurre es una disminución del drenaje de la fase líquida de la espuma.

La contaminación del fluido espumado con agua salada o aceite, puede afectar la estabilidad de la espuma, el incremento en la contaminación, disminuye la vida media de la misma, esto es debido principalmente a la disminución de la solubilidad del agente espumante con la presencia de los contaminantes.

I.- MARCO TEÓRICO

Los efectos de temperatura sobre los fluidos espumados, como en los fluidos de perforación convencionales, al incrementarse, actúa disminuyendo la estabilidad de la misma. Cuando la temperatura aumenta, las moléculas de ambos, gas y líquido aumentan su velocidad y causa que la espuma se drene rápidamente, disminuyendo su vida media.

Finalmente, un agente espumante debe ser soluble en los fluidos a ser espumados o no funcionará, pues un agente espumante, simplemente no puede espumar cuando no es parte del fluido.

La tabla (I.1.) Resume los impactos de cada factor sobre la efectividad de los agentes espumantes en general.

<i>Factor</i>	<i>Cambio</i>	<i>Efecto en el drenaje</i>	<i>Efecto sobre la estabilidad de la espuma</i>
<i>Concentración</i>	<i>Incrementa</i>	<i>Disminuye</i>	<i>Incrementa</i>
<i>Contaminación</i>	<i>Incrementa</i>	-----	<i>Disminuye</i>
<i>Temperatura</i>	<i>Incrementa</i>	<i>Incrementa</i>	<i>Disminuye</i>
<i>Solubilidad</i>	<i>Incrementa</i>	<i>Disminuye</i>	<i>Incrementa</i>

Tabla I.1. Efectos de los agentes espumantes

I.2.2.6. Inhibidores de corrosión:

Son una parte vital en el uso de espumas, el uso de aditivos controladores de corrosión son siempre más importantes cuando se usa el aire comprimido como la fase gaseosa del sistema. Hay que tomar en cuenta que la corrosión no puede ser detenida, sin embargo, puede ser controlada para que no sea un factor económico significativo.

Específicamente para espumas, los siguientes factores trabajan cada uno para incrementar o disminuir el ritmo de corrosión.

I.- MARCO TEÓRICO

La corrosión es más alta cuando el contenido de agua es alto. El contenido de agua es alto a profundidades grandes. La presencia de aceite ayudaría a disminuir el ritmo de corrosión, pero el aceite actúa como un desestabilizador o rompedor de la espuma.

El incremento de la conductividad de los electrolitos en un sistema (el fluido) podría causar que la corrosión incremente. La salmuera podría incrementar la conductividad y actuaría como desestabilizante de la espuma, hasta que la espuma se empiece a romper, la cantidad de agua fresca podría incrementarse. Esto podría acelerar el ritmo de corrosión.

Cuando la temperatura se incrementa, la corrosión se incrementa. Espumas expuestas a altas temperaturas también podrían romperse, cediendo agua fresca adicional. Esto aumenta el ritmo de corrosión.

El oxígeno es probablemente el peor agresor en los sistemas de fluidos de perforación con espumas con respecto a la corrosión. Cualquier sistema espumado generado con aire, podría ser potencialmente corrosivo, a menos que se tenga cuidado en el tratamiento para corrosión y esta sea controlada.

Dos categorías de inhibidores de corrosión existen. Los inhibidores Aniónicos son más compatibles con los agentes espumantes. Los inhibidores catiónicos, tienden a actuar contrariamente con los agentes espumantes y tienden a tener un efecto desestabilizante en el sistema del fluido. La tabla (I.2) muestra las clases de inhibidores, juntos con sus ventajas y desventajas.

I.- MARCO TEÓRICO

Categoría	Químico	Ventaja	Desventaja	Valoración Global
Aniónico	<i>Esteres</i>	<i>Compatible con espumantes.</i>		
	<i>Fosfáticos</i>	<i>Buena Solubilidad.</i>	<i>Costo</i>	<i>Excelente.</i>
	<i>Orgánicos</i>	<i>Biodegradable.</i>		
			<i>Requiere control de pH.</i>	<i>Buen inhibidor,</i>
	<i>Cromatos</i>	<i>Solubilidad extrema.</i>	<i>Requiere altas</i>	<i>pero</i>
		<i>Compatible con espumantes.</i>	<i>concentraciones.</i>	<i>ambientalmente</i>
catiónicos			<i>carcinogénico</i>	<i>inaceptable.</i>
			<i>Alta concentración es</i>	
	<i>Nitratos</i>	<i>Buena Solubilidad.</i>	<i>requerida.</i>	<i>Bueno</i>
		<i>Compatible con Espumantes.</i>	<i>Requiere de alto pH.</i>	
	<i>Fosfatos</i>	<i>Compatibilidad moderada con espumantes.</i>	<i>Incremento significativo en formación de escamas.</i>	<i>pobre</i>
			<i>Requiere otros aditivos</i>	
			<i>Película fácilmente</i>	
	<i>Aminas</i>	<i>Inhibidor de recubrimiento efectivo</i>	<i>penetrado por oxígeno.</i>	<i>Moderado.</i>
			<i>Incompatible con espumantes.</i>	

Tabla I.2. *Inhibidores químicos.*

I.2.2.7. Polímeros:

Polímero es un término que se refiere a varias sustancias orgánicas y sintéticas las cuales están compuestas por un número de repeticiones de unidades similares llamadas monómeros. Estas unidades son grupos de átomos consistentes principalmente de componentes de carbono.

Los polímeros son usados en los sistemas de perforación bajo balance para flocular los sólidos perforados, incrementando la lubricidad, incrementando la capacidad de acarreo y la viscosidad del sistema de perforación y para estabilizar arcillas y lutitas. Los polímeros usualmente utilizados en los sistemas de perforación bajo balance incluyen: Poliácridamidas, celulosa metil carboxilo, celulosa etil hidroxilo, goma Xantana y biopolímeros.

I.- MARCO TEÓRICO

La composición de los fluidos y el tipo de sistema de fluido de perforación que está siendo usado, dictamina que tipo de polímero es usado para cada aplicación. Los polímeros son generalmente usados en fluidos aireados, en niebla y espumas estables.

I.2.2.8. Estabilizadores de arcillas y lutitas:

Una nueva clase de productos desarrollados a finales de los 1980s y principios de los 1990s, es comúnmente referido como un sustituto o reemplazo del KCl. Estos productos líquidos, mas acertadamente descritos como sustitutos del KCl, ofrece ventajas económicas y ambientales en aplicaciones selectas. Éstas son diseñadas para proveer protección a las arcillas y lutitas hidratables fácilmente sin embarcarse en problemas de manejo asociados con la gran cantidad de material seco.

El cloruro de potasio ha sido exitosamente usado por décadas en los fluidos para prevenir la hidratación y el inchamiento de las arcillas y lutitas (esquistos).

El agua es absorbida por las arcillas de dos formas: La primera es una simple adsorción de capas monomoleculares de agua sobre las superficies planas de las ranuras de cristal de las arcillas. La segunda involucra hinchamiento osmótico. Esto resulta de una alta concentración de iones desarrollados por fuerzas electrostáticas de la vecindad de las superficies de la arcilla.

El cloruro de potasio actúa como inhibidor de la absorción de agua por las partículas de la arcilla. El ión catiónico de potasio preferiblemente se conecta con el aniónico de la arcilla o la cara de la lutita para prevenir el contacto con la altamente polar molécula de agua. Esta fuerte atracción química neutraliza a la carga aniónica de la arcilla o lutita y remueve el sitio activo de conjunción para el agua, evitando su hidratación.

I.- MARCO TEÓRICO

Los sustitutos del KCl están formados por una variedad de materiales catiónicos diseñados químicamente para estar atados a la superficie de las arcillas o lutitas, para proteger la superficie del contacto con el agua, estos productos son generalmente llamados como "*Líquidos de KCl*" Sin embargo, este es un nombre equivocado.

El sustituto de KCl no contiene ningún potasio. Este son otros iones catiónicos que funcionan de una forma similar al potasio cuando actúa con las arcillas o lutitas. Este producto está típicamente compuesto por cloruro de amonio cuaternario graso, sales de amina, aminas policuaternarias, polímeros catiónicos o una mezcla de componentes. Estos componentes han resultado efectivos en el control de la hidratación de las arcillas y las lutitas.

I.2.3.- LIMPIEZA DEL AGUJERO:

I.2.3.1. Capacidad de levantamiento:

La principal ventaja del uso de fluido espumado como fluido de perforación, es su superior capacidad de levantamiento comparado con cualquier otro fluido de perforación. La figura (I.3.) Muestra como la fuerza de levantamiento de un fluido se incrementa conforme el contenido de líquido se disminuye, hasta que se alcanza un punto óptimo. Pasado el punto óptimo, la fuerza de levantamiento cae hacia cero.

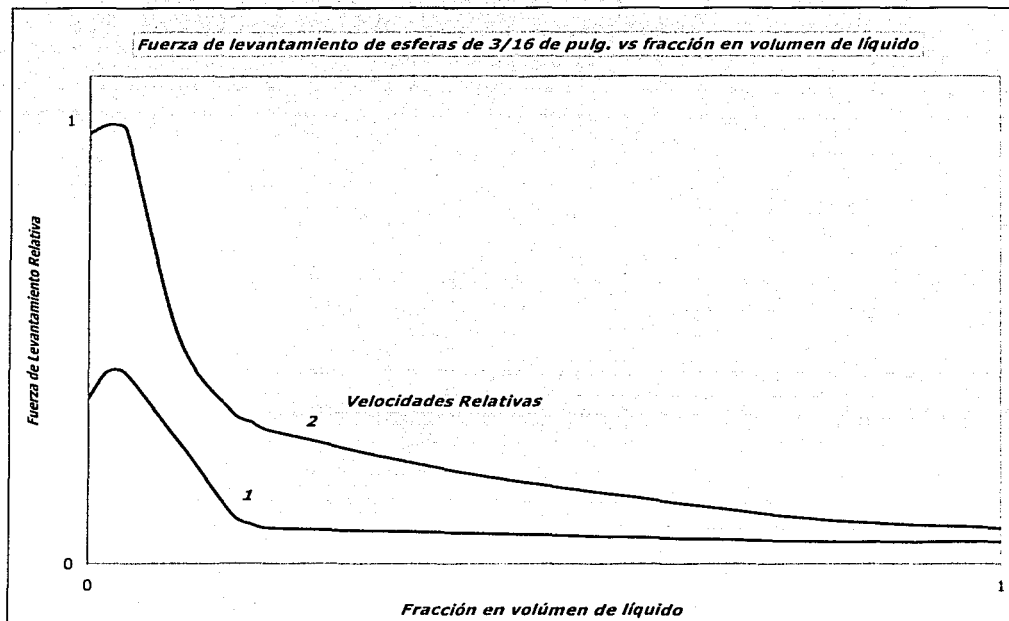


Fig.I.7. Capacidad de levantamiento (adaptado de Beyer et al., 1972)

En la región de espuma (55-97% de calidad de la espuma como se describió previamente), La capacidad de levantamiento del fluido alcanza su máximo. Entra aproximadamente 55 y 85% de calidad de espuma (15 - 45% por volumen de líquido), puede existir una espuma estable, y hace un trabajo adecuado de acarrear cualquier recorte o fluido de formación que entre al pozo. Si el líquido contiene mas de 45% en

I.- MARCO TEÓRICO

volumen (calidad de la espuma de 55% o menos), el fluido es considerado como un fluido aireado o una espuma inestable.

Una espuma inestable, tiene un comportamiento similar al de un fluido convencional. La limpieza del agujero es aún ligeramente función de la viscosidad, pero la velocidad se transforma en la fuerza dominante en la remoción de las partículas desde el pozo. Si la espuma inestable se rompiera, se podría tener un flujo tipo bache, este tipo de flujo es menos eficiente en la limpieza del agujero.

A una calidad de espuma mayor a 80 (menos del 20% de líquido en volumen) el fluido se encuentra en la mejor región de capacidad de acarreo. Un pozo desarrollado con espuma estable, teniendo una viscosidad similar a una nueva crema de afeitar, puede sostener una gran cantidad de recortes, aún cuando el flujo del fluido se detenga (no haya circulación). Esto puede ahorrar tiempo de conexiones, por que el pozo no deberá ser circulado desde el fondo hasta superficie.

Cerca al punto de transición entre espuma y niebla (sobre los 94 a 97% de gas en volumen), la espuma tiene su mejor capacidad de levantamiento. Infortunadamente, esta región de la espuma es más difícil de mantener. Este tipo de calidad de espuma, solo se obtendrá cerca de la superficie en el anular, si la presión es disminuida. La disminución en la presión está acompañada por un correspondiente aumento del volumen de la fase gas, y a menos que se mantenga el control sobre la expansión del gas, el fluido se convertirá en niebla.

La niebla y el aire, dependen enteramente de la velocidad para el levantamiento de los recortes y el sacado de líquidos del pozo. Si la transición a niebla se presenta, la expansión del gas proveerá un incremento en la velocidad, los ritmos de inyección de espumas, son mucho menores a los utilizados para aire o niebla, por eso, el incremento en la velocidad debida a la expansión del gas, probablemente no será suficiente para continuar limpiando el pozo.

I.- MARCO TEÓRICO

I.2.3.2. Limpieza del agujero:

La figura (I.8) muestra como se disminuye la capacidad de acarreo de aire y niebla comparado con el de espumas. Los recortes deben ser molidos mucho mas pequeños (más finos) con aire y niebla antes que estos puedan ser transportados a la superficie. La caída de velocidad en la parte de arriba de los lastrabarrenas, podría resultar en que los recortes se devolvieran en este sitio y el potencial para una cama de flotación o la formación de un anillo de lodo.

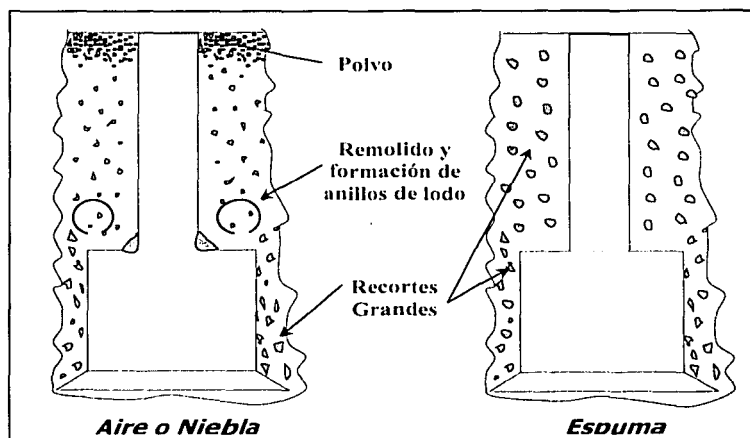


Fig. I.8. Limpieza del agujero.

Las espumas pueden acarrear recortes mas grandes, incluso, pasando los lastrabarrenas. El cambio de velocidad sobre los lastrabarrenas, no induce que los recortes se devuelvan por que el levantamiento de estos, no es tan dependiente de la velocidad, como lo es de la viscosidad.

I.2.3.3. Manteniendo la calidad de la espuma:

Pueden usarse varios métodos para mantener la calidad de la espuma en los rangos deseados. Por que la calidad de la espuma cambia con la presión (y la profundidad del pozo) y predecir estos cambios es muy difícil, un modelo computacional puede usarse para

1.- MARCO TEÓRICO

asegurar que la calidad de la espuma sea optima en los puntos críticos del pozo, durante las operaciones de perforación.

La manera más simple de mantener la calidad de la espuma podría ser ajustando la cantidad relativa de líquido y gas (o aire) inyectado en el pozo. Sin embargo, La expansión del gas en el anular o en la superficie a la presión atmosférica, debe prevenirse, para mantener una verdadera espuma en las cercanías de la superficie, ya que en este punto, el volumen de gas inyectado con respecto al de líquido, puede rebasar los límites de una espuma convirtiéndose en niebla (aprox. 95 a 97% de calidad).

La única manera de asegurarse que se mantenga una espuma verdadera (calidad de la espuma menor a 97%) a lo largo del sistema, es colocar presión en el anular en la superficie, al aumentar la presión, la calidad de la espuma baja. También, cualquier presión impuesta en la superficie tiene efectos en las condiciones de fondo del pozo.

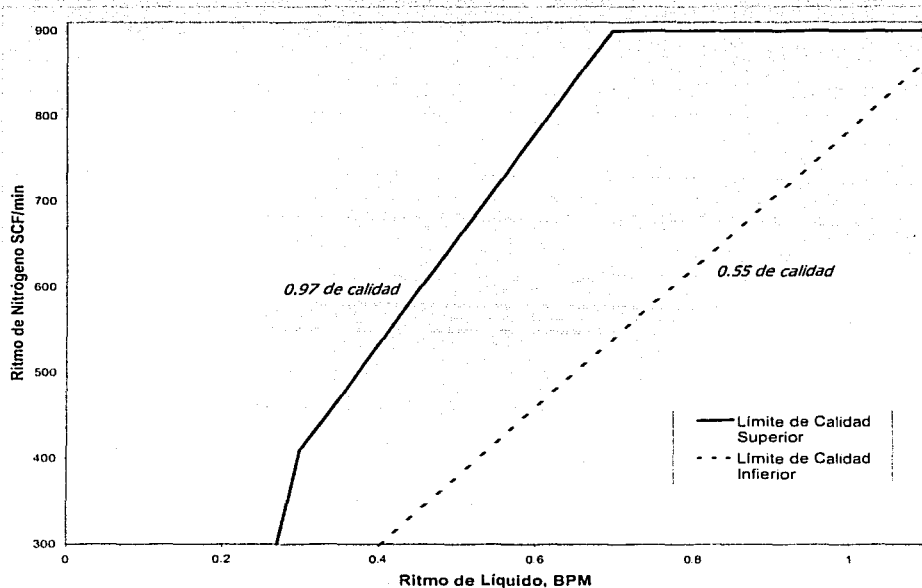


Fig. I.9. Mapa de calidad de una espuma (adaptado de Walton y Gu, 1996)

I.- MARCO TEÓRICO

La figura (I.9) muestra un mapa de calidad para un sistema con una presión específica impuesta en la superficie. El mapa de calidad de la espuma muestra la combinación del rango de ritmo flujo de gas / líquido la cual produciría una espuma con una calidad aceptable a lo largo del pozo. Este tipo de mapas puede ser generado con algún tipo de juego de condiciones usando un modelo computacional.

El efecto de la presión cuando se usa fluidos compresibles no es una correspondencia de uno a uno en el pozo, como con los lodos convencionales, así que debe tenerse mucho cuidado para prevenir que el fluido en el fondo, o en el anular se degrade a un flujo tipo bache. Esto podría pasar si la presión en el anular (de la superficie) disminuye la calidad de la espuma en el fondo por debajo de 55%. Pero, la única forma para estar seguros de ellos es usando modelos computacionales.

I.2.3.4. Velocidades del fluido:

Como la espuma tiene una habilidad superior para suspender recortes, la velocidad anular requerida para limpiar el agujero, será mucho menor que la necesitada con aire o niebla, Los fluidos de aire o niebla, deben circular a aproximadamente a 3000 pies/min, las espumas por otra parte, pueden limpiar adecuadamente el agujero a velocidades de 100 a 300 pies/min, similar a los fluidos convencionales. Cuando las espumas tienen una alta calidad y está a baja presión, puede moverse mas lento que un una espuma de baja calidad sometida a alta presión. Esto es por que el comportamiento reológico de las espumas se comporta más como un fluido convencional a bajas calidades, y tiene menor capacidad de levantamiento a dichas calidades.

Como la espuma puede moverse lentamente y aún limpiar el agujero, se requiere un menor volumen de aire o gas que si se tuviera aire o niebla. Esto resulta en beneficios para la espuma comparados con los otros fluidos. Menos compresión de gas significa menor potencia necesaria, ahorrando en combustible y renta de equipo.

I.- MARCO TEÓRICO

La tabla (I.3) resume las cantidades en volumen de gas y velocidades anulares requeridas para una limpieza adecuada del agujero para varios tipos de fluidos en agujeros de $7\frac{7}{8}$ a $8\frac{1}{2}$ pulgadas.

<i>Tipo de Fluido</i>	<i>Volumen de Aire (scfm)</i>	<i>Ritmo de Líquido (gpm)</i>	<i>Velocidad anular (ft/min)</i>	<i>Presión de Inyección (psi)</i>
Aire	2500	0	3000	100 - 200
Niebla	2750	0.4	3000	150 - 400
Espuma Estable	700	40	50 - 300	150 - 400
Lodo Convencional	0	300 - 400	100 - 300	1000 - 1600

Tabla I.3. Necesidades del sistema para fluidos compresibles.

Los ritmos actuales de inyección para ambos, líquidos y gas son dependientes de la presión de fondo. La presión de fondo impacta más fuertemente en la calidad de las espumas, la cual condiciona al fluido para seguir siendo espuma. Determinar el ritmo optimo es un proceso interactivo, pero los límites pueden ser fácilmente establecidos.

Para establecer dichos límites, Las fronteras superiores pueden ser fijadas como una combinación de flujo que llegue hasta la niebla (calidad de la espuma de 97 por ciento). Las fronteras inferiores, puede ser colocadas, cuando se alcance un flujo combinado de fluido aireado (calidad de la espuma de 55 por ciento).

I.2.4.- REOLOGÍA E HIDRÁULICA DE LAS ESPUMAS:

Una buena espuma de perforación tiene la apariencia de una crema de afeitar. Se podría esperar que las espumas de perforación puedan ser capaces de levantar los recortes desde el fondo del pozo, aún en velocidades anulares muy modestas. Varios factores interactúan para lograr la limpieza del agujero con espumas, por lo cual es un proceso muy difícil de modelar.

Primero, la reología de las espumas es compleja y fuertemente dependiente de la calidad de la misma. La viscosidad de la espuma es suficientemente alta como para que la caída de presión fluyendo alrededor del pozo sea mucho más grande que la que podría tener con gas seco o niebla como fluido de perforación. En un fluido de perforación aligerado, la fracción volumétrica gaseosa por definición es la calidad de la espuma y depende fuertemente de la presión. Existe una considerable interacción entre la reología y la presión de circulación. La simulación es tanto o más complicada, por la entrada de fluidos de la formación. Una entrada de gas podría incrementar la calidad de la espuma, posiblemente extenderla hasta que la espuma se rompa en niebla y pierda su viscosidad. Una entrada de líquido, podría conducir a la pérdida de la viscosidad e incrementar la densidad de la espuma.

Existen numerosos estudios de la reología de las espumas, cubriendo un amplio rango de tasas de flujo de líquido y de gas, composiciones y geometrías de flujo. Sin embargo, estos tienen diferencias en los resultados de los variados estudios, luego, Pueden realizarse varias conclusiones:

- ✓ Los dos factores que tienen el mayor impacto en el comportamiento de flujo de la espuma son calidad y ritmo de flujo (gasto).
- ✓ La viscosidad de la espuma es independiente de la concentración de los agentes espumantes en la fase líquida, al menos, cuando se usan agentes espumantes comunes en la industria, en concentraciones típicas para espumas de perforación.

1.- MARCO TEÓRICO

- ✓ Cuando se agregan agentes viscosificantes a la fase líquida, la viscosidad de la espuma se incrementa con el incremento de viscosidad de la fase líquida.

A condiciones de perforación de bajas presiones, las espumas son utilizadas para remover de la formación la entrada de agua mientras se perfora y para el transporte de recortes y otros sólidos del agujero. La remoción de sólidos puede ser particularmente difícil en diámetros de agujero grandes. La capacidad de acarreo de recortes de una espuma en particular depende de las propiedades reológicas del cuadrado de la velocidad anular del aire. Las propiedades reológicas de cada espuma dependen de la viscosidad de la fase líquida, de la fase gas y la fracción en volumen de gas (calidad de la espuma) o la fracción en volumen del líquido (LVF). Cuando la fracción en volumen del gas en una espuma dada, se encuentra entre 60 y 94%, el comportamiento de la espuma se desarrolla como un fluido plástico de Bingham. En este rango de calidad de la espuma, las relaciones entre la presión de flujo y el ritmo de flujo son más fácilmente calculados aunque estos no son intuitivos.

I.2.4.1. Hidráulica básica:

Los cálculos hidráulicos con espumas, como con los fluidos convencionales, dependen de un muy reducido número de parámetros asociados con cada fluido en particular. Si estos parámetros son conocidos, o pueden ser calculados, los cálculos hidráulicos pueden ser calculados. Una diferencia importante entre las espumas (o cualquier otro fluido multifásico compresible) y un lodo convencional, es que las propiedades de la espuma cambia continuamente dependiendo de la posición en el agujero. Las propiedades del fluido son también diferentes a la misma profundidad dependiendo donde se ubique la espuma, si dentro de la tubería o en el espacio anular.

Todas las propiedades del fluido son dependientes de las condiciones existentes en cada punto discreto en el sistema. Se han desarrollado programas sofisticados de computación para determinar los ritmos de gas óptimos y flujos de líquido, presiones, tiempo de circulación y características de transporte de recortes para una espuma dada, bajo un conjunto de condiciones.

I.2.4.2. Variables inherentes al fluido:

Las propiedades del fluido espumado de perforación que deben ser determinadas, incluyen peso del lodo (o densidad) y viscosidad. La densidad, podría en efecto ser un gradiente de densidad, el cual podría variar con la profundidad y la presión impuesta, también con la presión de inyección o con la presión de la válvula en el anular. Dependiendo del fluido y su viscosidad, puede determinarse un factor de fricción. Esto podría entrar en el análisis, y estos efectos podrían ser grandes o pequeños.

Como las fases múltiples presentes en las espumas son de naturaleza compresible, la determinación de la viscosidad está lejos de ser lineal. La figura (I.10) muestra como la viscosidad varía para una espuma con respecto a un líquido puro de un fluido base agua.

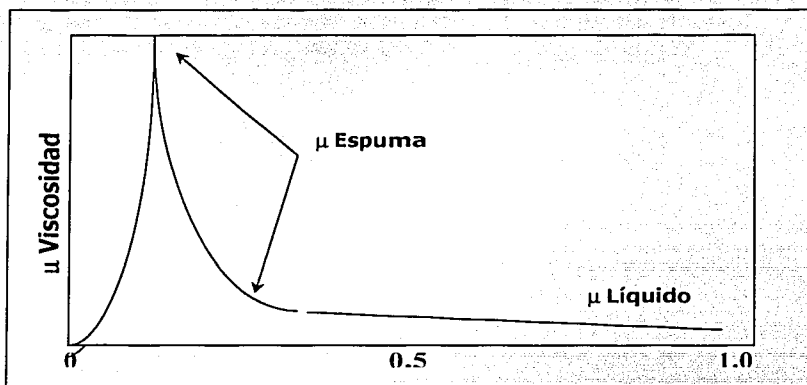


Fig. I.10. Viscosidad de Fluidos de Fase Variable Vs. Fracción en volumen de Líquido
(Adaptado de Lunan, 1996)

Otra variable que afecta las propiedades de la espuma es el contenido de sólidos en el fluido. Cuando una espuma estable es generada originalmente, no contiene sólidos. Las espumas rígidas por su parte, tienen intencionalmente un contenido en volumen de sólidos de entre el 3 y el 5%. Los sólidos contenidos se incrementan por los recortes de perforación, cuando el fluido se mueve dentro del espacio anular durante las operaciones de perforación. Por lo que el efecto de sólidos en la espuma debe tomarse en cuenta, ya que cambia tanto la viscosidad como la densidad del fluido.

I.- MARCO TEÓRICO

La presencia de contaminantes también tiene efectos en el comportamiento del fluido, lo cual es especialmente verdadero para las espumas. La presencia de aceite o agua salada puede causar el rompimiento de la espuma, a menos que la contaminación fuera esperada y una mezcla química adecuada fuera agregada para contrarrestarlo. Aún, pequeñas cantidades de agua dulce pueden romper una espuma por la disminución sustancial de la calidad de la misma, este es un tópico de especial interés para el presente trabajo.

La figura (I.11) muestra la tendencia general de cambios de varios parámetros de fluido en el comportamiento de la perforación. La figura muestra que, cuando todos los parámetros (excepto la pérdida de fluido) aumentan, el ritmo de perforación disminuye, lo opuesto es cierto para la pérdida de fluido.

Algunos de estos efectos tienen una tendencia opuesta a la deseada. Por ejemplo, cuando la viscosidad disminuye, el ritmo de perforación se incrementa. desafortunadamente, se requiere una alta viscosidad para poder incrementar el levantamiento de recortes. Cuantos mas recortes son sumados en el espacio anular, la viscosidad aparente tenderá a incrementarse, lo cual actua en detrimento del ritmo de perforación. Cada cambio en una propiedad del fluido, afecta enteramente al sistema. Cada cambio en las propiedades debe ser completamente evaluado antes de realizar intencionalmente dicho cambio.

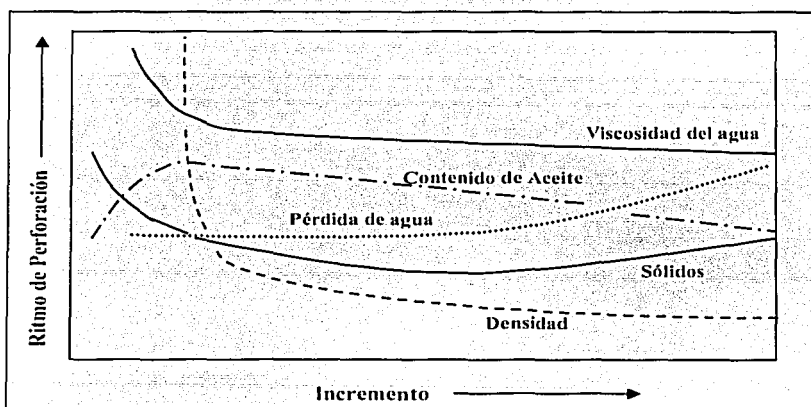


Fig. I.11. Efectos de las propiedades del fluido sobre el ritmo de perforación.
(Adaptado de Lunan y Bennion, 1996).

1.2.4.3. Variables ambientales de perforación:

Los efectos ambientales, los cuales no pueden ser controlados, también actúan para cambiar las propiedades del fluido. Los principales factores ambientales que actúan sobre cualquier sistema de espuma, son: temperatura, presión y contaminantes.

La reología de las espumas no es muy sensitiva a otras variables de flujo. **Beyer et al.** En 1972 estudió el flujo de espumas en varios diámetros internos de tubería, bajo un gran rango de presiones, temperaturas, calidades, velocidades de flujo y concentración de agentes espumantes. Ellos encontraron que la presión y la temperatura influyen la reología de la espuma principalmente por la regulación de la calidad. Ya que incrementando la presión, se reduce el volumen ocupado por la fase gaseosa, reduciendo la calidad de la espuma. Cuando se presenta esto, la presión tiene solo un impacto menor sobre la caída de presión, caracterizando el flujo de la espuma en el mismo gasto y calidad.

La figura (I.12) muestra como es el efecto de la temperatura sobre la viscosidad en tipos comunes de fluidos de perforación.

Incrementando la temperatura, se causa una expansión en el gas, produciendo un incremento en la calidad. Este es un efecto secundario de la temperatura sobre la viscosidad. Cuando la temperatura se incrementa de 70 °F hasta 180 °F, la caída de presión a un gasto constante y calidad, decrece en un 25%. Por comparación, la viscosidad del agua decrece en un 65% sobre el mismo intervalo de temperatura.

I.- MARCO TEÓRICO

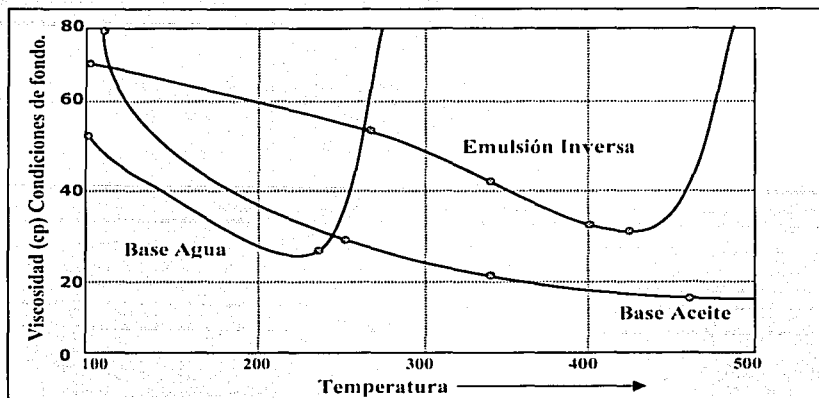


Fig. I.12. Efectos de la temperatura sobre la viscosidad de los fluidos de perforación. (Adaptado de Lunan y Bennion, 1996).

Los efectos de presión sobre la espuma y de la espuma sobre la presión resultante, no son intuitivas, pero, la figura (I.13) muestra como la presión de fondo disminuye cuando el ritmo de inyección de gas aumenta en un sistema de bajo balance.

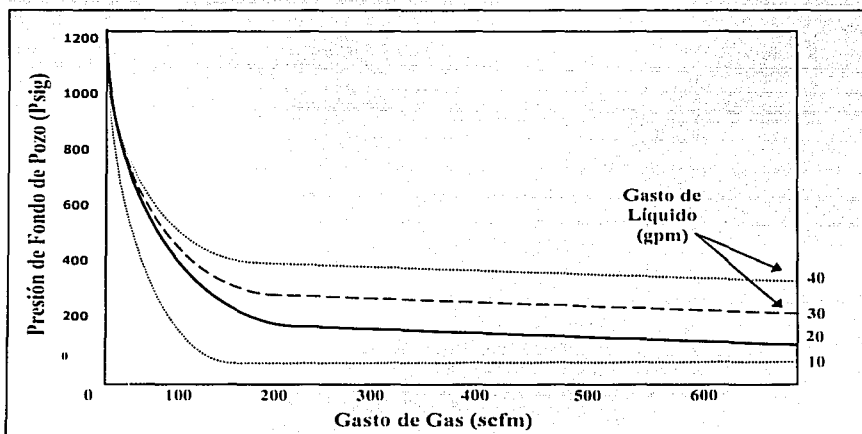


Fig. I.13. Presión de fondo Vs. ritmo de inyección de gas (adaptado de Lunan, 1996)

I.- MARCO TEÓRICO

También, cuando la presión de fondo se incrementa con el ritmo de inyección de líquido, la tendencia de este efecto son los que uno podría esperar.

No se puede decir lo mismo para la presión de inyección en superficie. La figura (I.14) muestra que la presión de inyección incrementa inicialmente con un incremento del ritmo de inyección de líquido. Después del incremento inicial, la presión de inyección declina con la inyección de líquido adicional (o disminuye la calidad de la espuma).

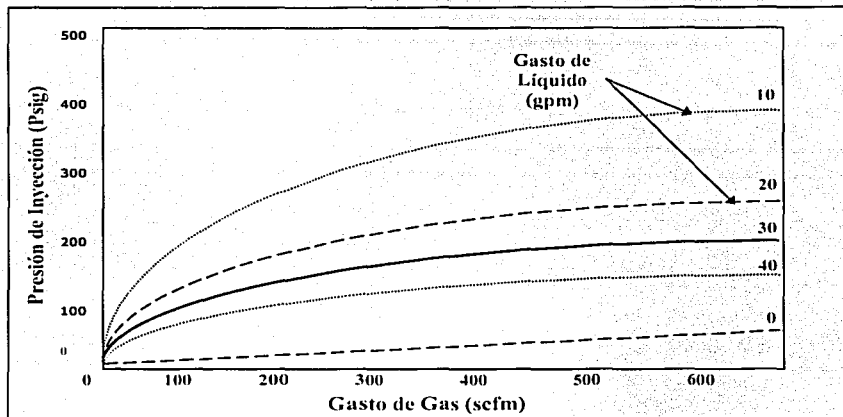


Fig. I.14. Presión de inyección vs. ritmo de gas a varios gastos de líquido.
(Adaptado de Lunan, 1996)

I.2.4.4. Variables controlables:

Una vez que la perforación ha empezado, hay muy pocas variables que pudieran ser ajustadas. La viscosidad de la fase líquida puede ser ajustada a una magnitud, pero de todas las variables controlables, ésta tiene un impacto menor en las condiciones de fondo con respecto a los cambios de fricción y de presión. El factor controlable primario es el ritmo de inyección del gas, el ritmo de inyección del líquido y la contrapresión (Presión de estrangulación) del anular.

I.- MARCO TEÓRICO

El incremento del ritmo de inyección de gas generalmente reduce la presión de fondo e incrementa la presión de inyección. Después de cierto punto, sin embargo, el gasto de gas puede incrementar la presión en el fondo del pozo, por que la presión se transforma de un régimen predominantemente hidrostático a un régimen dominado predominantemente por la fricción. La capacidad de acarreo de recortes es generalmente obtenido con altos ritmos de inyección de gas, hasta que el límite de la calidad de la espuma es alcanzado y ocurre un flujo tapón o niebla.

Ambas, la presión en el fondo y la presión de inyección podría generalmente incrementarse cuando el ritmo de inyección de líquido o la contrapresión son incrementados. Los efectos de estos cambios sobre la limpieza el agujero, podría variar.

La limpieza del agujero es usualmente mejorada cuando el ritmo de inyección de líquido es incrementado. Al incrementar la contrapresión (presión en el estrangulador) con fluidos convencionales podría usualmente inhibir la limpieza del agujero. Sin embargo, Si el incremento de la contrapresión se hace previniendo que la fase gaseosa no se rompa en la espuma (manteniendo la calidad), El transporte de los recortes podría ser mejorado al incrementar la contrapresión, haciendo el efecto de incrementar la viscosidad, la cual ayudaría en la limpieza mas eficiente del agujero.

El volumen de aire actual requerido, podría depender de la condición a la que el pozo este siendo perforado, pero el aire o gas debe ser mantenido entre 55 y 97% de la espuma para mantenerla.

Los efectos de los parámetros controlables en la hidráulica de los fluidos espumados, son reunidos en la tabla I.4.

Incremento de la variable.	Efecto sobre la presión de inyección.	Efecto sobre la presión de fondo.	Efecto sobre la limpieza del agujero.
Gasto de gas.	<i>Incrementa.</i>	<i>Decrece.</i>	<i>Mejora.</i>
Gasto de Líquido.	<i>Decrece.</i>	<i>Incrementa.</i>	<i>Mejora.</i>
Presión de estrang. En anular.	<i>Ligero incremento</i>	<i>Ligero Incremento</i>	<i>Mejora o Decrece.</i>
Viscosidad del fluido	<i>Ligero incremento</i>	<i>Ligero Incremento</i>	<i>Mejora</i>

Tabla I.4. Efectos de los parámetros controlables sobre la hidráulica de los fluidos espumados.

I.2.4.5. Modelos reológicos:

Las espumas pueden ser tratadas como un fluido pseudohomogéneo con las variables de densidad y viscosidad. Durante las operaciones con espumas, la calidad de la espuma es dependiente de la presión y la temperatura entre la sarta y el anular. La presión ha sido determinada usando la ecuación de balance de energía mecánica, en la cual la caída de presión friccional depende de los modelos reológicos imperantes en la espuma. Por tanto, es muy importante tener un acertado modelo reológico que describa el comportamiento que tiene la espuma.

Los modelos mas comúnmente usados en la industria de la perforación para describir el comportamiento de los fluidos no Newtonianos, son el modelo Plástico de Bingham y el modelo de Ley de Potencias. Los cálculos para la caída de presión friccional son listados por Bourgoyne y colaboradores (1986) y en API SPEC 10 (Beyer et al, 1972). El modelo plástico de Bingham es definido en la ecuación (I.1). Este tipo de fluido es caracterizado por un esfuerzo de corte mínimo, τ_y , que debe ser excedido para que el fluido pueda fluir, sobre este punto, el esfuerzo de corte es proporcional a la velocidad de corte.

I.- MARCO TEÓRICO

$$\tau = \mu_p \dot{\gamma} + \tau_y ; \tau > \tau_y$$

$$\dot{\gamma} = 0 ; \tau_y \geq \tau \geq -\tau_y$$

$$\tau = \mu_p \dot{\gamma} - \tau_y ; \tau < -\tau_y$$

Ec.- I.1

Donde:

τ = Esfuerzo de Corte (lbf/ft²).

$\dot{\gamma}$ = Velocidad de Corte (s⁻¹).

τ_y = Esfuerzo de Cedencia (lbf/ft²).

μ_p = Viscosidad del fluido (cp).

El modelo de Ley de Potencias es definida en la ecuación (I.2). Varios autores han concluido que el modelo de ley de potencia, es una mejor representación del comportamiento de flujo de las espumas, para un modelo de ley de potencias representado por:

$$\tau = K \dot{\gamma}^n$$

Ec.- I.2

Donde:

K = Índice de consistencia (lbf.sⁿ/ft²).

n = Índice de comportamiento de flujo. Adimensional.

Debido a la complejidad única del flujo de las espumas, los dos modelos reológicos descritos arriba, no pueden ser directamente aplicados a las espumas. Esto ha motivado que varios investigadores aplicarán otros modelos reológicos tradicionales de fluidos no-Newtonianos modificados, para describir el comportamiento de flujo de las espumas. Ambos tratamientos, los teóricos y experimentales están avanzando.

I.- MARCO TEÓRICO

Una aproximación teórica a la reología de las espumas, fue presentada por Einstein (1906). Su ecuación de la viscosidad para las calidades de la espuma entre 0 y 54% es:

$$\mu_F = \mu_L (1 + 2.5\Gamma)$$

Ec.- I.3

Donde:

μ_F = Viscosidad de la espuma (cp)

μ_L = Viscosidad de la base líquida (cp)

Γ = Calidad de la espuma (Fracción).

Hatschek's (1910 A y B) propuso una ecuación para la viscosidad de la interferencia entre las burbujas para una calidad de las burbujas entre 0 y 74% la cual está dada por:

$$\mu_F = \mu_L (1 + 4.5\Gamma)$$

Ec.- I.4

Su siguiente teoría describe la viscosidad de la espuma causada por el corte de un fluido entre burbujas de gas paralelepípedos. La calidad de la espuma para esta segunda teoría está entre los rangos de 75 a 100 por ciento. La viscosidad de la espuma en este rango, está expresada por:

$$\mu_F = \mu_L \left(\frac{1}{1 - \Gamma^{1/3}} \right)$$

Ec.- I.5

Debe anotarse que esta ecuación no es válida en el caso límite cuando la calidad de la espuma es del 100%.

I.- MARCO TEÓRICO

Mitchell en 1971 midió la reología de las espumas, por el flujo a través de tubos con pequeños diámetros. Él encontró que las espumas son efectivamente Newtonianas, para calidades sobre los 55%. Esto significa que la viscosidad es independiente de la tasa de corte, al menos en este nivel de calidad. En este régimen la viscosidad de la espuma fue relacionada con su calidad y la viscosidad de la fase líquida por:

$$\mu_F = \mu_L (1 + 3.6\Gamma)$$

Ec.- I.6

Para el rango de calidad de la espuma comprendida entre 54 y 100 por ciento, Mitchell desarrolló las siguiente expresión:

$$\mu_F = \mu_L \left(\frac{1}{1 - \Gamma^{0.49}} \right)$$

Ec.- I.7

Esta expresión, tampoco es aplicable cuando se tiene una calidad del 100%.

Mitchell también encontró que las espumas con calidades más grandes que aproximadamente 55% eran No-Newtonianas En velocidades de corte sobre los 20000 s^{-1} . El presentó esta reología usando el modelo plástico de Bingham:

$$\tau = \tau_y + \frac{\mu_p \gamma}{479}, \gamma \leq 2 * 10^4 \text{ s}^{-1}$$

Ec.- I.8

Donde:

τ = Esfuerzo de Corte (lbf/ft²).

γ = Velocidad de Corte (s⁻¹).

τ_y = Esfuerzo de Cedencia (lbf/ft²).

μ_p = Viscosidad del fluido (cp).

I.- MARCO TEÓRICO

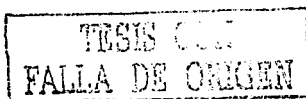
Mitchell determinó valores para la viscosidad plástica y esfuerzo de cedencia, como función de la calidad de la espuma. Estas son mostradas en la figura (I.15.)

Ambas, viscosidad plástica y esfuerzo de cedencia se incrementan con el incremento de la calidad, arriba de los 96% de calidad que fue la calidad más alta estudiada. El rango de viscosidad plástica va desde menos de 4 cp a un 60% de calidad, a más de 15 cp a 96% de calidad.

El esfuerzo de cedencia se incrementa desde menos de 0.1 lbf/ft² a más de 2 lbf/ft² sobre el mismo rango.

(Teniendo en cuenta que el esfuerzo de cedencia de los lodos de perforación están usualmente reportadas en unidades de lbf/100 ft², es claro que a una alta calidad de la espuma, se puede tener una resistencia al flujo mucho más grande que muchos líquidos de perforación.)

Beyer et al. 1972 también concluyeron que las espumas podrían ser descritas como un plástico de Bingham. Ellos notaron que estas tienen un deslizamiento entre el flujo de la espuma y las paredes de la tubería usadas en el experimento. Esto complica la determinación de la viscosidad plástica y el esfuerzo de cedencia desde la medición de la presión de flujo. Haciendo consideraciones para este deslizamiento, ellos encontraron que el esfuerzo de cedencia es independiente de la calidad de la espuma, en el rango del 75 al 98%. Con un valor de 0.1 lbf/ft². Ellos reportaron una viscosidad plástica más grande que la de Mitchell. Reflejando un más bajo punto de cedencia y deslizamiento.



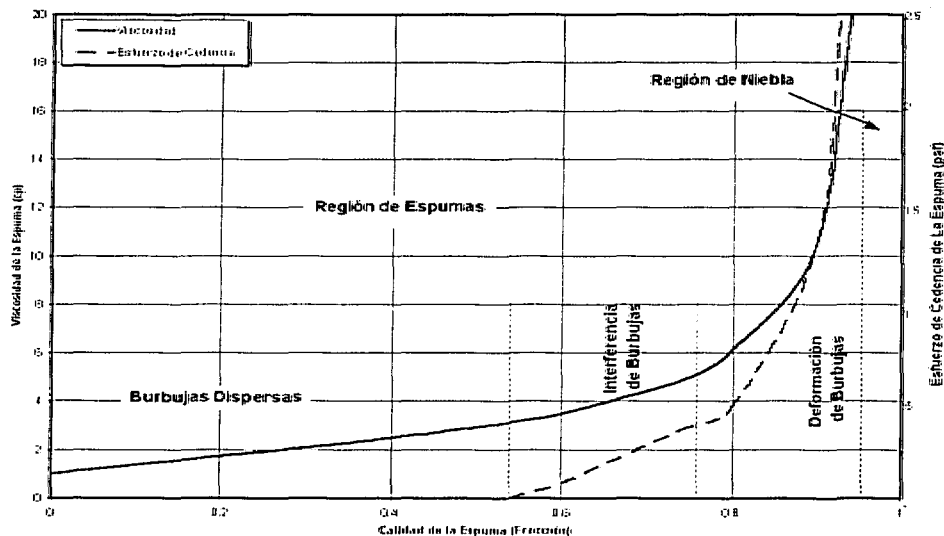


Fig. 1.15. Viscosidad plástica y punto de cedencia de espumas como función de la calidad de la espuma (adaptado de Mitchell, 1971)

Sus rangos de viscosidad plástica están cercanos a 40 cp a 75% de calidad y sobre los 100 cp a 97 % de calidad.

Sanghani e Ikoku (1983), reportaron valores para K y n, determinados de experimentos realizados usando una geometría anular. Estos datos cubren un rango de velocidades de corte desde 100 hasta 1000 s^{-1} . Ellos reportaron viscosidades efectivas de un rango entre 60 a 500 cp. De nuevo, la viscosidad incrementa con el incremento de la calidad alrededor del 94%. Después de esta, la viscosidad decrece con el incremento en la calidad. Reflejando el rompimiento de la espuma en niebla. Sin embargo, aun en una calidad del 97.5%, la viscosidad fue comparable con la viscosidad de una espuma de 80% de calidad. En valores más altos que 97,5% de calidad, la viscosidad de la espuma cae rápidamente, implicando que la eficiencia en el transporte de los recortes, podría ser pobre si la calidad de la espuma se incrementara por encima de los 97.5%.

I.- MARCO TEÓRICO

Estos datos fueron interpretados por **Okpobiri y Ikoku** en 1986 para indicar que el flujo de la espuma podría ser laminar para un número de Reynolds menor a 3000. Esto implicaría que muchas de las operaciones de perforación con espumas podrían ser realizadas en flujo laminar.

La viscosidad efectiva (el esfuerzo de corte dividido por la velocidad de corte) es uno de los parámetros de comparación de resultados en estos diferentes estudios de reología de espumas. La figura I.13 muestra La viscosidad efectiva de las espumas, como lo reportó Mitchell, en 1971, Beyer et al en 1972 y Sanghani y Ikoku en 1983 en varias tasas de corte y calidades de espuma. A pesar de las diferencias entre los valores reportados, está claro que perforar con una espuma tiene una alta viscosidad efectiva en todas las condiciones y que esta viscosidad podría incrementarse cuando la calidad de la espuma se incrementa, al menos arriba del 90% de calidad.

I.- MARCO TEÓRICO

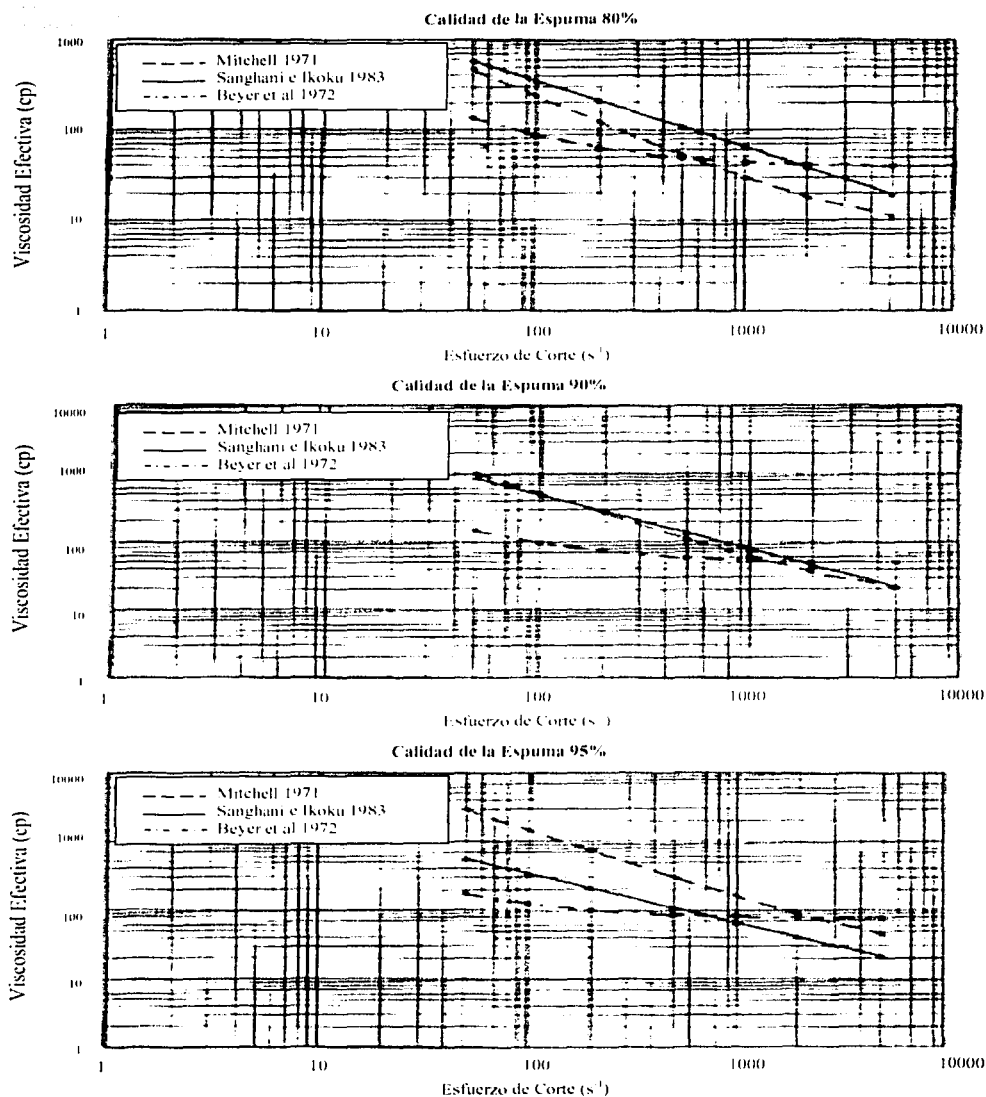


Fig. I.16. Viscosidad efectiva de espumas como una función de la velocidad de corte y la calidad de las espumas (datos de Mitchell, 1971, Beyer, 1972 y Sanghani y Ikoku, 1983).

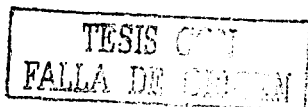
I.- MARCO TEÓRICO

Krug (1971) Presentó una viscosidad plástica y esfuerzos de cedencia de espumas, como función de la calidad de la misma, estos datos se reportan en la tabla (I.5)

<i>Calidad (%)</i>	<i>Viscosidad plástica (cp)</i>	<i>Esfuerzo de cedencia (lbf/100 pies²)</i>
0	1.02	0
0 a 25	1.25	0
25 a 30	1.58	0
30 a 35	1.60	0
35 a 45	2.40	0
45 a 55	2.88	0
55 a 60	3.36	0
60 a 65	3.70	14
65 a 70	4.30	23
70 a 75	5.00	40
75 a 80	5.76	48
80 a 86	7.21	68
86 a 90	9.58	100
90 a 96	14.38	250

Tabla I.5. Viscosidad plástica y esfuerzo de cedencia de espumas (Krug, 1971)

Okpobiri e Ikoku (1986) Estudiaron experimentalmente la reología de espumas usando un viscosímetro anular concéntrico que simulaba cercanamente las condiciones actuales de un pozo. Ellos concluyeron que la espuma es un fluido Pseudoplástico de ley de potencias con ambos, índice de comportamiento de flujo (n) e índice de consistencia (k) como funciones de la calidad de la espuma. Las propiedades del fluido para diferentes calidades de espuma son enumerados en la tabla (I.4).



Calidad		K_s	Índice de consistencia de flujo	
<u>Rango de Γ</u>	<u>Promedio de Γ</u>	<u>(lbf secⁿ / pie²)</u>	<u>(lbf secⁿ⁻² / pie)</u>	<u>n</u>
0.96 a 0.977	0.97	0.0946	2.566	0.326
0.94 a 0.96	0.95	0.1228	3.323	0.290
0.91 a 0.92	0.915	0.2262	6.155	0.187
0.89 a 0.91	0.90	0.2079	5.647	0.200
0.84 a 0.86	0.85	0.1828	4.958	0.214
0.79 a 0.81	0.80	0.1344	3.635	0.262
0.77 a 0.78	0.775	0.1236	3.343	0.273
0.74 a 0.76	0.75	0.1078	2.918	0.295
0.72 a 0.73	0.725	0.1061	2.8716	0.293
0.69 a 0.71	0.70	0.1026	2.777	0.295
0.65 a 0.69	0.67	0.1022	2.766	0.290

Tabla I.6. Propiedades de flujo para espumas (Okpobiri y Ikoku, 1986).

Algunos Investigadores han encontrado que el modelo de potencias fue estadísticamente superior al modelo plástico de Bingham para datos en correlaciones. Sin embargo, otros experimentos mostraron que la espuma tratada obedece mas a un comportamiento del modelo plástico de Bingham. Por lo que ambos modelos deben ser tenidos en cuenta para caracterizar cualquier espuma.

I.2.4.6. Ecuaciones de flujo de las espumas:

En el caso especial de un sistema de dos fases como son las espumas, el gas es disperso fina y uniformemente en la fase líquida, puede ser asumido como un fluido pseudohomogéneo y no se requiere una ecuación especial para la interfase. Las espumas consisten de un componente compresible (gas) y un componente incompresible (líquido). El componente incompresible es fácil de manejar por que su viscosidad es constante. El gas compresible requiere de mucha más atención, pues su densidad depende de la temperatura y la presión.

I.- MARCO TEÓRICO

La presión es analíticamente acoplada con las fracciones en volúmenes de gas, a través de un factor de fricción. Una versión mejorada de la ecuación de caída de presión de Lord (1981) y el método de Spoerker y Colaboradores (1991) son usados para la derivación de las ecuaciones siguientes. El factor de fricción es calculado a lo largo del pozo más que asumirlo constante.

1.- Ecuación de estado:

La relación entre la variación de la densidad de un fluido con la presión y la temperatura es denominada como la ecuación de estado. Para los propósitos ingenieriles, la forma mas práctica de la ecuación de estado para gases reales es llamada la Ley de los gases de Ingeniería y una forma de ella es, (Grovier y Asís, 1987):

$$V_g = \frac{ZRT}{M_g P}$$

Ec.- I.9.

Donde:

V_g = Volumen Específico del Gas (ft^3/lb).

Z = Factor de Compresibilidad del Gas.

M_g = Peso Molecular del Gas ($\text{lbm}/\text{lb-mol}$).

R = Constante de los Gases, $10.73 \frac{(\text{psia}) \cdot (\text{ft}^3)}{(\text{lb-mol}) \cdot (^\circ\text{R})}$

T = Temperatura Absoluta ($^\circ\text{R}$).

P = Presión Absoluta (psia).

Otra ecuación de estado sugerida es la ecuación del Virial (truncado después del segundo término) (Reid et al., 1987).

$$V_g = \frac{RT}{M_g} \left(\frac{1}{P + P^e} + B' \dots \right)$$

Ec.- I.10.

Donde:

I.- MARCO TEÓRICO

P^e = Exceso de Presión debida a la Tensión superficial (psi).

$$= \frac{4\sigma}{r} \quad (\sigma = \text{Tensión Superficial (Lb/in)}, r = \text{Radio de la burbuja (in)}).$$

B' = Segundo coeficiente del Virial Modificado (psia^{-1}).

Para cálculos ingenieriles, el exceso de la presión puede ser despreciado, esto daría:

$$V_g = \frac{RT}{M_g} \left(\frac{1}{P} + B' \right)$$

Ec.- I.11.

La ecuación de estado puede ser expresada como:

$$V = \frac{a}{P} + b$$

Ec.- I.12.

Donde:

V = Volumen específico de la Espuma.

Los coeficientes a y b son definidos en el (anexo A). En el anular, cuando la espuma transita por allí, se mezcla con recortes de roca. Esto significa que son tres fases presentes en el anular, mezcla en la cual, el líquido y los recortes son incompresibles, mientras que la fase gas es compresible.

2.- Ecuaciones de energía mecánica:

Una vez que la ecuación de estado para la espuma ha sido establecido, el siguiente paso es usar las ecuaciones de energía y momentum, para analizar el comportamiento dinámico de la misma.

Para el flujo hacia abajo, dentro de la tubería, la ecuación diferencial de balance de energía dinámica es:

Camilo E. Libreros M.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

I.- MARCO TEÓRICO

$$\frac{u \cdot du}{g_c} - \frac{g \cdot d(VD)}{g_c} + V \cdot dp + \frac{2u^2 f \cdot d(MD)}{g_c \cdot D} = 0$$

Ec.- I.13.

Donde:

u = Velocidad Promedio de la Espuma, (ft/s)

f = Factor de Fricción de Fanning.

g = Aceleración de la gravedad (ft/s²).

$g_c = 32.2$ (ft-lbm)/(lbf-s²).

MD = Profundidad Medida, Ft

VD = Profundidad Vertical, Ft.

D = Diam Int. de la sarta, in.

V = Ecuación de Estado.

La Velocidad Promedio de la espuma, u , puede ser obtenido usando la ecuación de continuidad. En términos de volumen específico, puede ser expresado como:

$$u = cV = \frac{ac}{P} + bc$$

Ec.- I.14.

Donde el coeficiente c es definido en el (anexo A).

Después, sustituimos la Ecuación (I.14) dentro de la Ecuación (I.13), la ecuación diferencial de balance de energía mecánica toma la forma de:

$$\frac{dp}{d(MD)} = F_p(MD, p)$$

Ec.- I.15.

Para el flujo ascendente, en el anular, la ecuación de balance diferencial de energía mecánica, toma la forma de:

TESIS CON
FALLA DE CONTEN

I.- MARCO TEÓRICO

$$\frac{u \cdot du}{g_c} - \frac{g \cdot d(VD)}{g_c} + V \cdot dp + \frac{2u^2 f \cdot d(MD)}{g_c \cdot (D_h - D_p)} = 0$$

Ec.-I.16.

Donde:

D_h = Diámetro del agujero abierto, (in).

D_p = Diámetro Exterior de la tubería de perforación, (in).

La velocidad promedio de la espuma en el anular se describe también por medio de la ecuación (I.14). Sin embargo, la variable c para el flujo ascendente por el anular es diferente (Ver anexo A).

Sustituyendo la velocidad anular en la ecuación (I.16) se obtiene la siguiente ecuación diferencial de balance de energía mecánico para el flujo ascendente en el anular:

$$\frac{dp}{d(MD)} = F_A(MD, p)$$

Ec.-I.17.

Las ecuaciones I.15 y I.17 pueden ser resueltas numéricamente. La Contrapresión, la cual es conocida, sirve como una condición de frontera para la ecuación I.17. Las técnicas numéricas son usadas para calcular una secuencia de valores de presión correspondientes a valores discretos de las profundidades medidas. Las expresiones para F_p y F_a están dadas en el (anexo A).

3.- Caídas de presión a través de las boquillas:

Para calcular las caídas de presión a través de pequeñas restricciones, como una boquilla de barrena (Fig.-I.14) generalmente se asume que:

- ✓ El cambio en la elevación es despreciable.
- ✓ La velocidad de subida de la boquilla es despreciable.

I.- MARCO TEÓRICO

- ✓ La pérdida de presión friccional a través de la boquilla es despreciable.

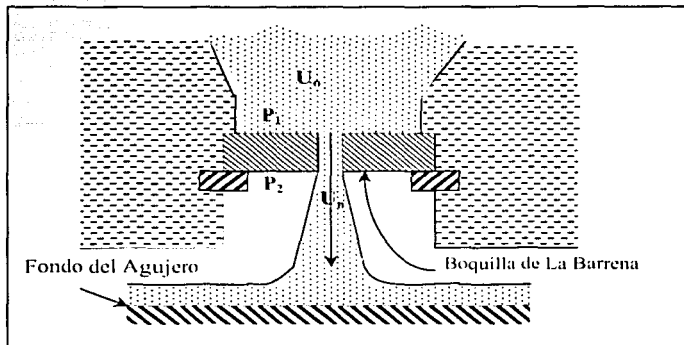


Fig. I.17. Flujo a través de una boquilla de Barrena
(Adaptado de Okpobiri y Ikoku, 1986)

Luego, la ecuación (I.13) se transforma en:

$$\frac{u \cdot du}{g_c} + V \cdot dp = 0$$

Ec.- I.18.

Sustituyendo la ecuación (I.12) y (I.14) en la ecuación (I.18) e integrando obtenemos la siguiente expresión en unidades de campo.

$$b(p_2 - p_1) + a \cdot \ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right) + 8.1 \cdot 10^{-4} \cdot U_n^2 = 0$$

Ec.- I.19.

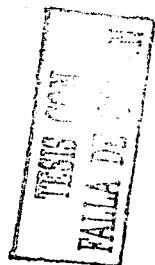
Donde:

- P_1 = Presión arriba de la boquilla. (Psi).
- P_2 = Presión en el fondo del Pozo. (Psi).
- U_n = Velocidad en la boquilla. (Ft/s).

La velocidad en la boquilla U_n es definida como:

$$U_n = \frac{ac'}{P_2} + bc'$$

Ec.- I.20.



1.- MARCO TEÓRICO

La ecuación (I.19) puede ser resuelta numéricamente y obtener la presión en la parte de arriba de la boquilla P_1 . La presión en el fondo es calculada de la ecuación (I.17). La constante c' en la ecuación (I.20) es explicada en el (anexo A).

I.2.4.7. Modelamiento de afluentes:

Una de las ventajas de la perforación con espumas es la baja presión de fondo, lo cual incrementa la tasa de penetración. Sin embargo, las entradas de gas, agua o aceite pueden ocurrir como resultado de esta baja presión de fondo. Estos afluentes podrían cambiar el sistema de espuma existente, resultando en un cambio de los perfiles de presión dentro de la tubería de perforación así como en el anular.

La densidad total del líquido puede ser calculada para los ritmos y densidades de los de líquidos Inyectados y de los afluentes de agua y aceite.

$$\rho_t = \rho_o f_o + \sum_i^N \rho_i f_i$$

Ec.- I.21.

Donde:

ρ_o = Densidad del líquido en la espuma (lb/gal).

$$f_o = \frac{q_o}{q_o + \sum_{i=1}^N q_i}$$

Ec.- I.22.

$$f_i = \frac{q_i}{q_o + \sum_{i=1}^N q_i}$$

q_o = Ritmo de Inyección de Líquido (gal/min).

q_i = Ritmo de entrada o afluente de agua y aceite (gal/min).

N = Número de entradas de agua y aceite.

La densidad final del líquido puede ser calculada de una forma similar.

I.- MARCO TEÓRICO

El peso molecular de la mezcla del gas inyectado y el gas que a entrado puede ser calculado usando factores similares a los usados para el cálculo de la densidad y viscosidad del líquido. Esto es:

$$M_g = M_{go} f_o + \sum_i^N M_{gi} f_i$$

Ec.- I.23

Donde:

- M_{go} = Peso molecular del gas de la espuma (lb/lbmol).
 M_{gi} = Peso molecular del gas de Formación (lb/lbmol).
 f_{go} = fracción másica del gas inyectado (fracción).
 f_{gi} = fracción másica del gas de formación (fracción).
 M_g = Peso Molecular de la mezcla (lb/lbmol).

$$f_o = \frac{m_{go}}{m_{go} + \sum_{i=1}^N m_{gi}}$$

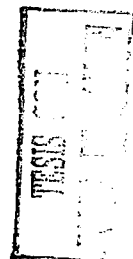
Ec.- I.24.

$$f_i = \frac{m_{gi}}{m_{go} + \sum_{i=1}^N m_{gi}}$$

Las ecuaciones de estado para el flujo de gas y de espuma que sube por anular, deberían usar estos parámetros ajustados para modelar la posición anular sobre los puntos de afluencia (entrada de flujo).

I.2.4.8. Capacidad de acarreo de recortes:

Otra ventaja de la perforación con espumas es su alta capacidad de acarreo de recortes. Por ejemplo, el punto de cedencia y la viscosidad plástica de una espuma que se comporta como plástico de Bingham, se incrementa cuando la calidad de la espuma se incrementa. Esto incrementará la viscosidad efectiva de la espuma y aumentará la capacidad de acarreo de recortes. La velocidad de deslizamiento de la partícula, la cual define el ritmo al cual un recorte de un diámetro dado y gravedad específica establecida sale del fluido. Se puede utilizar diferentes correlaciones desarrolladas (Bourgoyne Jr. et al., 1986) para determinar la velocidad de deslizamiento de un sistema espumado.



1.- MARCO TEÓRICO

1.- La correlación de Moore:

Moore ha propuesto un procedimiento para la aplicación de la ecuación de velocidad de deslizamiento partiendo de la ecuación para fluidos estáticos dada por:

$$V_{sl} = 1.89 \cdot \sqrt{\frac{d_s \cdot \rho_s - \rho_f}{f \cdot \rho_f}}$$

Ec.- I.25

Para las condiciones promedio de flujo experimentadas durante la perforación. El método involucra las ecuaciones de pérdida de presión por fricción para un modelo de potencias y modelos de fluidos Newtonianos. La correlación de Moore incluye la obtención de la viscosidad Newtoniana aparente como sigue:

$$\mu_a = \frac{K}{144} \left(\frac{D_h - D_p}{U_a} \right)^{1-n} \left(\frac{2 + \frac{1}{n}}{0.0208} \right)^n$$

Ec.- I.26

Donde:

- U_a = Velocidad Media anular (ft/seg.).
- D_h = Diámetro del Agujero (in).
- D_p = Diámetro de la tubería (in).
- K = Índice de Consistencia (lb.sⁿ/ft²)).
- n = Índice de comportamiento de Flujo.

Esta viscosidad aparente es usada en el lugar de la viscosidad Newtoniana en el cálculo del número de Reynolds dado por:

$$N_{re} = \frac{928 \cdot \rho_f \cdot V_{sl} \cdot d_s}{\mu_a}$$

Ec.- I.27

I.- MARCO TEÓRICO

Donde:

ρ_f = Densidad de la espuma, (lb/gal).

d_s = Diámetro de la partícula, (pulg).

V_{sl} = Velocidad de deslizamiento, (Ft/s).

En la ecuación (I.26) la velocidad de deslizamiento V_{sl} no es conocida y deber ser obtenida por iteración. Para Números de Reynolds más grandes que 300 ($N_{re} = 300$), el flujo alrededor de la partícula es turbulento y el factor de fricción se mantiene esencialmente constante en un valor alrededor de 1.5. Por esta condición, la velocidad de deslizamiento se reduce a:

$$V_{sl} = 1.54 \cdot \sqrt{d_s \frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_f}}$$

Ec.- I.28

Donde:

ρ_f = Densidad del sólido (Lb/gal).

Para partículas con números de Reynolds de tres o menores ($N_{re} \leq 3$), el patrón de flujo es considerado como laminar y la gráfica de factor de fricción muestra una línea recta como:

$$f = \frac{40}{N_{Re}}$$

Ec.- I.28

Para esta condición, la velocidad de deslizamiento se transforma en:

$$V_{sl} = 82.87 \cdot \frac{d_s^2}{\mu_a} \cdot (\rho_s - \rho_f)$$

Ec.- I.29

Para números de Reynolds intermedios, es decir, entre 3 y 300 ($3 < N_{re} < 300$), La línea de aproximación para el factor de fricción (Como se muestra en la figura I.15), viene dado por:

I.- MARCO TEÓRICO

$$f = \frac{22}{\sqrt{N_{Re}}}$$

Ec.- I.30

Y para esta relación, una aproximación a la velocidad de deslizamiento viene dada por:

$$V_{sl} = \frac{2.9 \cdot d_s \cdot (\rho_s - \rho_f)^{0.667}}{\rho_f^{0.333} \cdot \mu_a^{0.333}}$$

Ec.- I.31

Esto corresponde a un flujo transicional entre el flujo laminar y un flujo turbulento totalmente desarrollado.

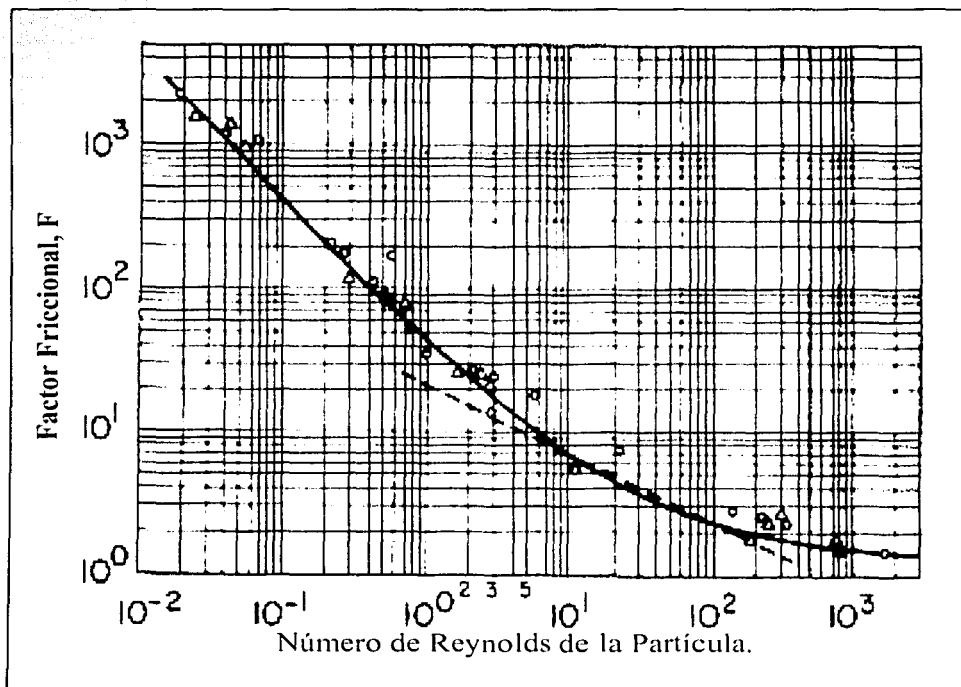


Fig. I.18. correlación de Moore para la velocidad de la partícula.

TESIS CON
FALLA DE CUBEN

1.- MARCO TEÓRICO

2.- Correlación de Chien:

La correlación de Chien es similar a la de Moore en el sentido que esta involucra el cálculo de una viscosidad Aparente Newtoniana, para ser usada en la determinación de un número de Reynolds particular. Para el uso de fluidos tipo poliméricos, Chien recomienda el cálculo de la viscosidad aparente usando:

$$\mu_a = \mu_p + 5 \cdot \frac{\tau_y d_s}{U_a}$$

Ec.- I.30

Donde:

μ_a = Viscosidad Aparente (cp). U_a = Velocidad Media anular (ft/seg.).
 μ_p = Viscosidad Plástica (cp). d_s = Diámetro de la partícula (in).
 τ_y = Esfuerzo de Cedencia (lb/100ft²).

Sin embargo, para suspensiones de bentonita en agua, se recomienda que la viscosidad plástica sea usada por la viscosidad aparente. Para números de Reynolds sobre 100 (**$N_{re} > 100$**), Chien recomienda el uso del valor (1.72) para el factor de fricción. Este es sólo ligeramente más alto que el valor propuesto por Moore de (1.5) Para números bajos (flujo transicional) de Números de Reynolds, la siguiente correlación fue presentada como:

$$V_{sl} = 0.0075 \left(\frac{\mu_a}{\rho_f d_s} \right) \left[\frac{36800 d_s}{\left(\frac{\mu_a}{\rho_f d_s} \right)^2} \left(\frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_f} \right) + 1 - 1 \right]$$

Ec.- I.31

Donde:

V_{sl} = Velocidad de Deslizamiento (ft/seg.) μ_a = Viscosidad Aparente (cp).
 ρ_f = Densidad del Fluido (Lb/gal). d_s = Diámetro de la partícula (in).
 ρ_s = Densidad del Fluido (Lb/gal).

3.- La correlación de Walker y Mayes:

Esta correlación usa el factor de fricción definido para un disco circular de caída plana (cara horizontal plana), en lugar que el de una esfera. Para esta configuración en particular se tiene que:

$$f = \frac{2gh}{V_{sl}^2} \left(\frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_f} \right) \quad \text{Ec.- I.32}$$

Donde:

h = Espesor del disco (ft).

g = Aceleración de la gravedad (ft/seg²).

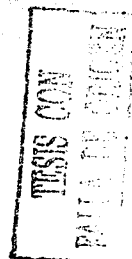
Para números de Reynolds mayores a 100 (**$N_{re} > 100$**), el régimen de flujo es considerado turbulento y f se asume constante a un valor de (1.12), sustituyendo este valor en la ecuación (I.32) y convirtiéndolo a unidades de campo se tiene:

$$V_{sl} = 2.19 \sqrt{h \frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_f}} \quad \text{Ec.- I.33}$$

Para el cálculo de un número de Reynolds particular, éstos autores desarrollaron una relación empírica para los esfuerzos de corte debido al deslizamiento de la partícula. La relación del esfuerzo de corte, dada en unidades de campo es:

$$\tau_s = 7.9 \sqrt{h \cdot (\rho_s - \rho_f)} \quad \text{Ec.- I.34}$$

La velocidad de corte V_s (seg.⁻¹) correspondiente al esfuerzo de corte τ_s es determinada usando una gráfica de esfuerzo de corte (Lectura x 1.066) contra velocidad de corte (velocidad del rotor x 1.703) usando para esto un viscosímetro rotacional convencional. La viscosidad aparente para el cálculo de un número de Reynolds se obtiene con:



I.- MARCO TEÓRICO

$$\mu_a = 479 \frac{\tau_s}{\gamma}$$

Ec.- I.35

Si el número de Reynolds es más grande que 100 ($N_{re} > 100$), la velocidad de deslizamiento es calculada con la ecuación (1.33) la siguiente correlación se desarrolla para cuando el número de Reynolds es menor a 100 ($N_{re} < 100$).

$$V_{sl} = 0.0203 \cdot \tau_s \sqrt{\frac{d_s \gamma}{\rho_f}}$$

Ec.- I.36

Donde:

d_s = Diámetro del disco (in).

Se puede observar que la viscosidad aparente está basada en la velocidad de corte relativa de la partícula al fluido y no toma en cuenta el esfuerzo del fluido debido a la velocidad del líquido en el anular. Entonces, la correlación de la velocidad de deslizamiento que predicen Walker y Mayes es una correlación independiente de la velocidad anular.

Para las aplicaciones de campo, un diámetro representativo de la partícula d_s y un espesor h deben ser estimados de muestras de recortes de rocas.

Relación de transporte de recortes:

Los recortes avanzan hacia la superficie a un ritmo igual a la diferencia entre la velocidad del fluido y la velocidad de deslizamiento de la partícula. La velocidad de la partícula relativa a la superficie es llamada la *Velocidad de transporte*.

$$V_T = U_a - V_{sl}$$

Ec.- I.37

La relación de Transporte se define como la velocidad de transporte dividida por la velocidad media anular.

Camilo E. Libreros M.

TESIS CON
FALLA DE SEÑAL

$$F_T = \frac{V_T}{U_a} = 1 - \frac{V_{sl}}{U_a}$$

Ec.- I.38

Para una relación de transporte positiva, los recortes están siendo transportados a la superficie. Para una velocidad de deslizamiento de cero, significa que la velocidad del recorte es igual a la velocidad media anular y la relación de transporte de recortes es la unidad. Cuando la velocidad de deslizamiento se incrementa, la relación de transporte disminuye y la concentración de recortes en el anular en camino para la superficie aumenta. La relación de transporte de recortes es, una excelente medida de la capacidad de acarreo de un fluido de perforación en particular.

(Bourgoyne y Sample) desarrollaron una gráfica de la relación de transporte vs. El recíproco de la velocidad anular y se encontró que era una técnica gráfica muy conveniente, como se puede ver en la ecuación (1.38), si la velocidad de deslizamiento es independiente de la velocidad anular, se tendrá como resultado una línea recta. La pendiente de la línea es numéricamente igual a la velocidad de la partícula, y la intercepción con el eje de las x es igual al recíproco de la velocidad de deslizamiento de la partícula. La intercepción con el eje y, el cual corresponde a una infinita velocidad anular, debe ser igual a la relación de transporte de uno. Los autores encontraron que para velocidades anulares menores de 120 (ft/min), la velocidad de deslizamiento fue esencialmente independiente de la velocidad anular. Entonces, haciendo una determinación experimental de la velocidad de deslizamiento en una columna estática y luego, graficando una línea desde la intercepción y de uno (1.0) a la intercepción de x de $1/V_s$, Una representación aproximada de la relación de transporte de recortes podría ser obtenida.

La aplicación de todos los métodos anteriores, son mostrados en la figura (I.16). Cabe anotar que el método gráfico de Sample y Bourgoyne da los mejores resultados para este ejemplo y que los dato experimentales tanto como los calculados con las distintas correlaciones esencialmente dan una línea recta.

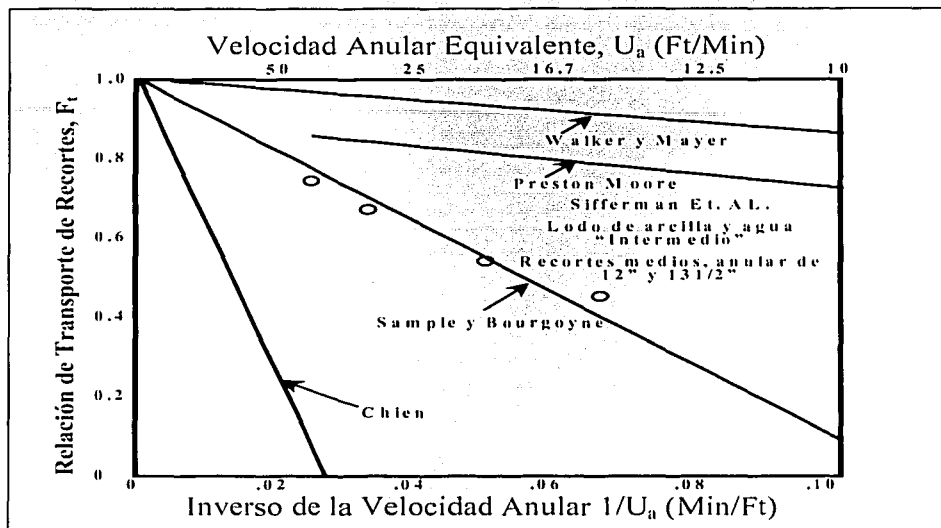


Fig.- 1.19. Comparación de varios métodos de predicción de relaciones de transporte de recortes. (Adaptado de Bourgoyne et. Al, 1991).

II.- METODOLOGÍA

II.- METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

II.1 CARACTERÍSTICAS DEL FLUIDO:

La formulación de la espuma viene dada como sigue:

Material	Cantidad	Función
Agua.	1000 lts	Base del sistema
Alcalinizante.	0.1 % Peso	(<i>Sosa Cáustica</i>) incremento del rendimiento de las arcillas, auxilia en el control de corrosión oxígeno
Viscosificante.	2 a 3 % Peso	(<i>Bentonita</i>) proporciona estructura rígida al fluido, formación de enjarre y poder de suspensión
Gelificante.	2 a 3 % Peso	(<i>Geltex o Suspentone</i>) para fluidos base aceite, proporciona estabilidad a la espuma a temperatura de 150°C, mejora la suspensión
Inhibidor de Lutitas.	0.4 a 0.7 % Volumen.	(<i>Clay Seal</i>) disminuye o evita la hidratación de los cuellos arcillosos
Viscosificante.	0.4 a 1.5 % Peso.	(<i>hermachek</i>) viscosidad adicional y sostenida a 150°C, forma enjarre fino, flexible y resistente
Inhibidor de Corrosión.	0.3 % Peso	(<i>Barracor 1635</i>) secuestra el oxígeno del aire el fluido, controla la velocidad de corrosión
Espumante.	1 -2 % Volumen	(<i>Barafoam</i>) esencial para la formación de espuma, resistente a 150°C

Tabla II.1. Componentes completos del fluido espumado de perforación (BPU).

II.- METODOLOGÍA

Los principales requisitos impuestos al fluido de perforación fueron:

1. Base 100% agua
 2. Densidad hasta de 0.50 gr/cc
 3. Alta reología
 4. Comportamiento de fluido de perforación
 5. Reciclable en circuito cerrado, sin descargas a la atmósfera
 6. Resistente a 150 °C de temperatura
 7. Carácter inhibitorio
 8. Equipo de perforación sin modificaciones a sus componentes
- 100 % libre de diesel

CAPÍTULO II.

METODOLOGÍA

EXPERIMENTAL

II.- METODOLOGÍA

II.2 VARIABLES:

II.2.1. Tipos de variables:

Como se pudo observar en el marco teórico, las variables, las podemos separar como controlables y no controlables, inherentes al fluido y ambientales, para el diseño de las siguientes pruebas, se manejarán, aquellas propiedades que puedan influir en la caracterización de la espuma contaminada:

Las variables controlables son:

- A. Ritmo de Inyección de gas.
- B. Ritmo de inyección del líquido.
- C. Contrapresión.

Como variables inherentes al fluido se tienen:

- D. Densidad de la espuma.
- E. Viscosidad de la espuma.
- F. Contenido de contaminantes en el fluido.

Como variables no controlables o ambientales, se tienen:

- G. Temperatura.
- H. Presión.
- I. Contaminantes.

II.2.2. Definición de variables:

Ahora bien, en el diseño de las pruebas y según los parámetros operativos que se manejan, cualquiera de estas variables, pudiera ser controlada para los efectos que hubiera lugar, por ende, se necesita buscar un nuevo parámetro, (aunque sea de manera

II.- METODOLOGÍA

cualitativa) que pueda identificar con mayor precisión, cuales de estas tienen mayor influencia con respecto a las otras y cuales propiedades pueden ser reflejo de la variación de las mismas. Para tal fin, se hará una prueba utilizada en el diseño de proyectos de desarrollo tecnológico, pero que puede ser aplicado para los casos de diseños experimentales, esta prueba se denomina la matriz de Vester

II.2.3. Matriz de Vester:

Esta herramienta tiene su función, al facilitar la identificación así como la relación existente entre las causas y consecuencias de un problema, este instrumento de planificación, lo desarrolló Frederick Vester y ha sido aplicado con un gran éxito en el campo del desarrollo regional, su gran ventaja, es la participación en la comprensión y explicación de los problemas en forma sencilla. Los elementos que la constituyen, se presentan a continuación y son adaptados de (*Rapp et al. 1993*).

La Matriz de Vester es un formato de doble entrada en donde se ubican, tanto filas como en columnas, los problemas (en nuestro caso la variables) identificadas como de mayor importancia para el sistema.

VARIABLES.	VAR. A	VAR. B	VAR. C	VAR. N
VAR. A				
VAR. B				
VAR. C				
VAR. N				

Tabla II.2. Formato de una matriz Vester.

Las etapas para construir la matriz son:

A.- identificar con una letra o número las variables que se van a relacionar. (No se recomiendan mas de 14 variables en la matriz, si fuera el caso, es mejor subdividir las variables del sistema.

II.- METODOLOGÍA

B.- Apreciar y colocar en la matriz el nivel de causalidad (directa o Indirecta) de cada variable sobre cada una de las demás.

Para este objeto, se tienen cuatro tipos de calificaciones, desarrolladas así:

a.- 0. No es causa.

b.- 1. Es causa Indirecta.

c.- 2. Es causa medianamente directa.

d.- 3. Es causa Muy directa.

C.- Para el cálculo de la actividad o pasividad de cada problema, el cual corresponde al grado de causalidad o consecuencia que cada problema tiene sobre los demás se realiza de la siguiente forma:

Total Activo: Es la suma del puntaje horizontal de cada variable y corresponde a la apreciación del grado de influencia de la variable sobre las demás. Una variable con alto puntaje indica que influencia sobre muchas otras o viceversa.

Total Pasivo: Es la suma del puntaje vertical de cada variable y corresponde a la apreciación del grado de influencia de las demás sobre la variable analizada, es decir el nivel de influencia sobre esta variable. Un puntaje alto, significa que la variable es influenciada por muchas otras.

Estos parámetros de influencia –como se pueden apreciar- son de carácter cualitativo, pero pueden proveer una orientación de donde realizar los estudios necesarios para que se puedan modelar.

Así, considerando las nueve variables listadas arriba como las de importancia para nuestro experimento, manteniendo el orden y caracterización en las que fueron listadas, y discutiendo las causalidades que tienen estas, comparadas con las encontradas en la literatura, se puede desarrollar la Matriz de Vester así:

II.- METODOLOGÍA

Variables	A	B	C	D	E	F	G	H	I	Total Activos
A		0	1	3	2	0	2	3	0	11
B	0		1	3	3	0	1	3	0	11
C	2	2		1	0	0	0	2	1	8
D	0	0	0		0	0	0	0	2	2
E	0	0	0	0		0	0	1	0	1
F	0	0	0	3	3		0	0	0	6
G	0	0	0	3	3	0		0	0	6
H	0	0	1	0	0	0	0		3	4
I	0	0	0	3	3	3	0	0		9
Total Pasivo	2	2	3	16	14	3	3	9	6	

Tabla II.3. Matriz de Vester que muestra las variables calificadas según su nivel de actividad y pasividad.

II.2.3.1. Operación de variables:

A.- Clasificación de los problemas según su grado de causalidad o consecuencia.

De acuerdo con la calificación obtenida en cuanto a su actividad como su pasividad, se definen cuatro tipos de variables.

Variables activas:

Aquellas que tienen un total activo alto y un pasivo bajo, son las variables que influyen mucho sobre las demás, pero que no son influidas por otras. Deben tener una alta prioridad en su manejo y predicción ya que afecta de manera importante a las demás.

II.- METODOLOGÍA

Variables pasivas:

Aquellas que tienen un total pasivo alto y un total activo bajo, representan las variables que no influyen de manera importante sobre las otras pero que son influenciadas por la mayoría de las demás. Pueden utilizarse como medidas de cambio y eficiencia de la intervención de las variables activas, ya que manifiestan los cambios hechos en ellas.

Variables críticas:

Aquellas que tienen un total de activos y pasivos altos, representan a aquellas que tienen efectos apreciables sobre otras y que es influencia por las demás.

Estas variables requerirían un tratamiento especial en el tipo de pruebas planteadas puesto que puede desestabilizar cualquier tipo de planteamiento desarrollado.

Variables indiferentes:

Son aquellas que tiene un total pasivo y activo bajo, representan las variables que no tienen ningún efecto de causalidad sobre el conjunto analizado y no es influenciada por ninguna de las otras variables.

En una gráfica cartesiana, cada una de las variables listadas arriba, se ubican de la siguiente manera (ver Fig. II.1):

Realizando la grafica de las variables que se han mostrado de interés para el sistema de fluido espumado, se obtiene la figura (II.2).

En este gráfico, se puede observar que las variables activas son:

II.- METODOLOGÍA

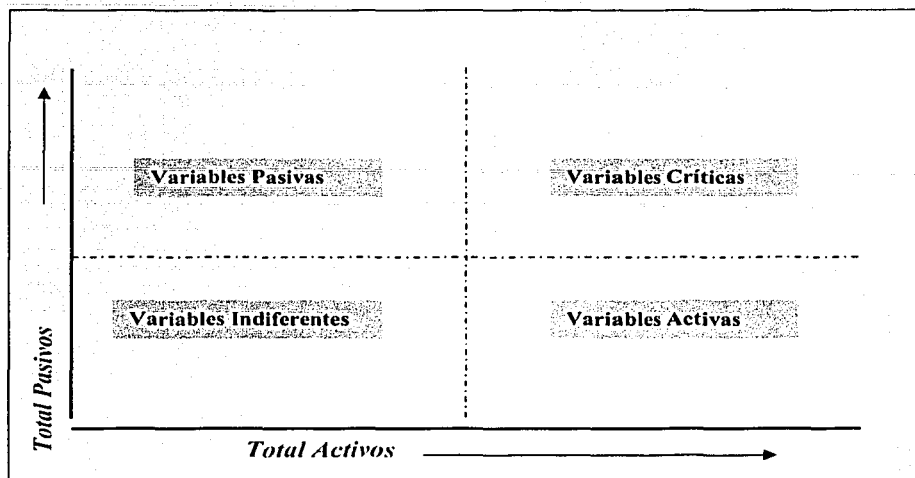


Fig. II.1. Tipificación de las variables según su grado de influencia.

(A) Ritmo de Inyección del gas, (B) Ritmo o gasto de Inyección del Líquido, (C) La contrapresión del sistema, (G) Temperatura del Sistema, (F) Contenido de sólidos de la espuma, (I) Contaminantes de la formación.

Así mismo, las variables pasivas son:

(D) Densidad, (E) Viscosidad, (H) Presión de Inyección.

Lo cual confirma en gran medida las tendencias de interrelaciones observadas en las operaciones con estos tipos de sistemas.

II.- METODOLOGÍA

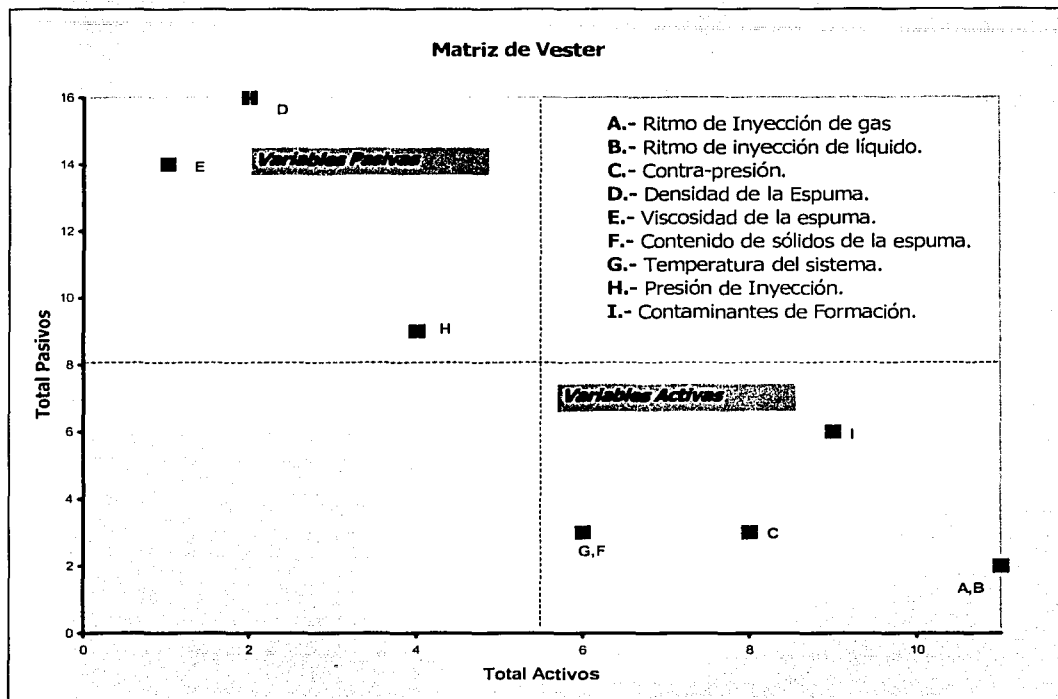


Fig. II.2. Tipificación de las variables involucradas en el proceso del lodo espumado.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

II.- METODOLOGÍA

II.2.3.2. Manejo de variables para desarrollar las pruebas:

Como una de las incógnitas por desarrollar en el presente trabajo, es que tipo de variables se manejarán para poder determinar una influencia de contaminantes sobre la espuma, se desarrollará la metodología arriba descrita para dar algunas luces de que tipo de variables se manejarán. Así, teniendo en cuenta que el tema de interés de la presente tesis son los contaminantes, un posible bosquejo de variables influyentes en este proceso son:

- X1:** Calidad de la Espuma.
- X2:** Concentración de sal en la salmuera.
- X3:** Porcentaje en volumen de contaminación con salmuera.
- X4:** Tiempo de vida media de la Espuma.
- X5:** Tipo de sal en la salmuera.
- X6:** Porcentaje de Aceite como contaminante.

Realizando un análisis para la determinación de los puntajes de la Matriz se tiene:

Variable X1 : (Calidad)

Se ha analizado la posible causalidad que tiene esta variable sobre la X2, es decir, sobre la concentración de sal en la salmuera y se ha determinado que no posee ninguna influencia sobre esta, por lo que se le asigna un puntaje de cero.

Sobre la variable X2, el porcentaje en volumen de contaminación que entra en la espuma, se ha decidido que el tipo de calidad existente en la espuma, no es una causal directa de la anterior, ya que esta depende principalmente de las condiciones de Bajobalance existentes en el sistema, por lo que se le asigna un puntaje de uno ya que las condiciones Bajobalance, en cierta medida, dichas condiciones, están relacionadas con la calidad.

Con respecto a la variable X3 (Tiempo de Vida Media de la espuma), se determina que posiblemente existe una interacción moderada sobre esta variable, por lo que se la asigna

II.- METODOLOGÍA

un puntaje de dos puntos, ya que se supone que hay algún tipo de relación con dicha variable.

Sobre la variable X5, (Tipo de sal en la salmuera) definitivamente no tiene ninguna interacción con esta, ya que dicha variable, depende de las condiciones propias del subsuelo. De allí que se le asigne un puntaje de cero.

Sobre la variable X6, (Porcentaje de Aceite como contaminante) se determina que el mismo rango de causalidad que tendría con el porcentaje de entrada de un contaminante tipo salmuera, por lo que también se le asigna un puntaje de uno

Variable X2 : (Concentración de sal en la salmuera)

La causalidad que pudiera tener esta variable sobre la calidad (X1) es nula, pues esta depende de las condiciones existentes en el subsuelo y la otra depende básicamente de las condiciones de inyección de los caudales de líquido y gas, por lo que se le asigna un puntaje de cero.

Con la Variable X3 (Porcentaje de contaminación en la espuma) tampoco se intuye algún tipo de interacción ya que esta variable, como se ha dicho, depende de las condiciones de Bajobalance existentes en el pozo.

Con la Variable X4 (Tiempo de Vida Media) se hace la especulación teórica de una posible interacción sobre el tiempo de vida media, esto, debido a la posible influencia química de la existencia de una mayor saturación de sal en la salmuera contaminante, con respecto a los componentes químicos de la espuma, luego se propone una interacción moderada, asignándose un puntaje de dos.

Sobre la variable X5 (Tipo de sal en la salmuera) se podría tener una interacción, aunque observándose bien, no tiene por que tener una causalidad el que un tipo específico de sal, influya en la concentración de la misma, por lo que se decide asignar un puntaje de cero a la misma.

II.- METODOLOGÍA

En la influencia sobre la variable X6 (Porcentaje de aceite como contaminante) se determina cualitativamente que la concentración de sal en la salmuera, no tiene por que influenciar sobre la posible cantidad de aceite que contamine la espuma, luego, su puntaje asignado es cero.

Variable X3 : (porcentaje en volumen de contaminación con salmuera)

Esta variable, sobre la variable X1 (calidad) tiene una influencia moderada, ya que al tener una cantidad determinada de entrada de un fluido líquido, hace variar la proporción líquida componente de la espuma, por lo que la hace variar, con lo cual, se le asigna una interacción no tan marcada, es decir, se le asigna un puntaje de dos sobre dicha variable.

En la interacción con la variable X2 (Concentración de sal en la salmuera), esta variable no tiene ninguna causalidad, ya que es una variable que aparece en la interacción del proceso de perforación con la zona donde se encuentre la salmuera, y no es una variable inherente a la salmuera, por lo que su puntaje es de cero.

Con respecto a la variable X4 (Tiempo de vida media de la espuma) se determina que efectivamente su causalidad es muy alta, llegando incluso a la posibilidad de cambiarla o modificarla casi al 100 por ciento, por lo que el puntaje asignado con respecto a esta variable es de 3.

Sobre las variables X5 y X6 (tipo de sal en la salmuera y porcentaje de contaminación con aceite) respectivamente, esta variable, con la primera no tiene ningún tipo de causalidad, mientras que con la segunda, posiblemente exista algún tipo de causalidad indirecta, debida básicamente a que al entrar mayor cantidad de salmuera, posiblemente inhiba la entrada de contaminación por aceite, por lo que con la primera variable, se asigna un puntaje de cero y con la segunda un puntaje de uno.

II.- METODOLOGÍA

Variable X4 (Tiempo de vida media de la espuma)

De esta variable y de su posible causalidad sobre las demás variables, cabe anotar que no parece tenerla, pues no afecta ni directa, ni indirectamente a alguna de ellas, de tipo que al variarla, vaya a producirse una variación en las demás no por lo menos debida a esta, por lo cual, con respecto a las demás variables, se les asignará un puntaje de cero para todas.

Variable X5 (Tipo de sal en la salmuera)

De esta variable y su posible interacción con las variables X1 (calidad), X2 (Concentración de sal en la salmuera) y X3 (Porcentaje de contaminación con salmuera en la espuma) no exhibe una relación de causalidad, por lo que con estas variables, su asignación de puntaje es de cero.

Con respecto a la variable X4 (Tiempo de vida media de la espuma) posiblemente haya algún tipo de causalidad moderada, debido a las reacciones químicas probables con respecto a la composición de la espuma, por lo que se le asigna un puntaje de dos.

En la causalidad de esta variable, sobre la variable X6 (porcentaje de contaminación con aceite), se observa una causalidad nula sobre esta, por lo que el puntaje asignado es de cero puntos.

Variable X6 (Porcentaje de contaminación con aceite)

Con respecto a la variable X1 (calidad), suponiendo que la espuma pudiese sostener al aceite y mantenerlo en el sistema pseudohomogéneo, este componente tiene una influencia moderada sobre la calidad por lo que se la asigna un puntaje de uno, con la salvedad de comprobar que dicha suposición es cierta.

II.- METODOLOGÍA

Observando la causalidad existente con la variable X2 (Concentración de sal en la salmuera) esta variable no tiene ninguna causalidad con respecto a la otra, por lo que el puntaje asignado a su causalidad es de cero.

Sobre la influencia en la variable X3 (Porcentaje de contaminación de salmuera en la espuma), existe algún tipo de causalidad, ya que la presencia de contaminación con aceite podría restringir al porcentaje de contaminación con salmuera, por lo que se asigna un puntaje de uno.

De la causalidad con la variable X4 es de anotar que su influencia o causalidad es directa, por lo que la asignación de la causalidad con respecto a dicha variable es de tres puntos.

Ahora, en la causalidad con respecto a la variable X5 (Tipo de sal en la salmuera) no tiene ningún tipo de influencia, por lo que el puntaje asignado a este rublo es cero.

Entonces, desarrollando la matriz de Vester para dichas variables, se obtiene:

VARIABLES.	VAR. X1	VAR. X2	VAR. X3	VAR. X4	VAR. X5	VAR. X6	Total Activos
VAR. X1		0	1	2	0	1	4
VAR. X2	0		0	3	0	0	3
VAR. X3	2	0		3	0	1	6
VAR. X4	0	0	0		0	0	0
VAR. X5	0	0	0	2		0	2
VAR. X6	1	0	1	3	0		4
Total Pasivos	3	0	2	12	0	2	

Tabla II.4. Matriz de Vester que muestra las variables Para contaminación calificadas según su nivel de actividad y pasividad.

II.- METODOLOGÍA

Con esta información y los resultados obtenidos en la matriz, se hace la construcción gráfica de la misma para determinar los tipos de variables que se tienen, resultando en la siguiente gráfica:

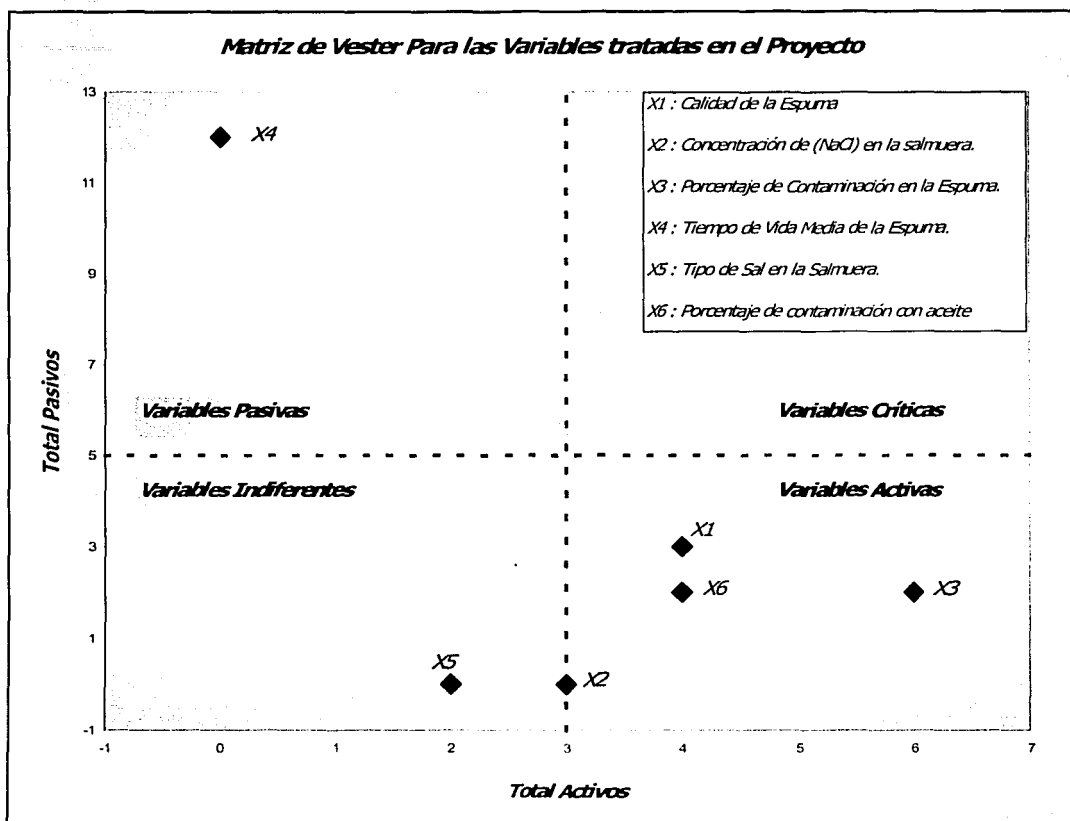


Fig. II.3. Tipificación de las variables involucradas en el proceso de contaminación de las espumas.

Es decir, aquí se nos muestra que la variable pasiva, susceptible de medición es el tiempo de vida media de la espuma, ya que según este modelo, es la variable que es más altamente influenciada por las demás y esta no tiene influencia sobre las restantes.

II.- METODOLOGÍA

Por otra parte, las Variables mas activas son: la variable Porcentaje de Contaminación de la Espuma, calidad de la espuma, porcentaje de contaminación con aceite y concentración de (NaCl) en la Salmuera (aunque se encuentre en el límite con el tipo de variables indiferentes), por lo que son una variables que influyen altamente en nuestra variable pasiva y no son influidas por las demás, estas variables son muy importantes para poder modelar su comportamiento, todo debido a su gran influencia.

II.- METODOLOGÍA

II.2.4. HIPÓTESIS:

Siendo la hipótesis la posible respuesta a la pregunta primaria, la cual plantea la incertidumbre del comportamiento de la espuma aquí tratada frente a diferentes tipos de contaminantes, expresada en términos experimentales, se procederá a plantearse un tipo de hipótesis nula, que plantea un enunciado contrario a los comportamientos observados en las espumas tradicionales. Es decir, nuestras hipótesis, tendrán unos enunciados contrarios a los que normalmente se han encontrado en las operaciones y experimentaciones anteriores a esta:

A.- El tiempo de vida media y la estabilidad de la espuma aquí tratada, (objeto de la investigación), presenta un rango de contaminación por sal superior a los encontrados normalmente en la literatura de 60000 a 120000 mg/lit, manteniendo su relativa estabilidad como espuma.

B.- Las propiedades físicas de densidad y viscosidad, presentan variaciones con respecto a la presión, la temperatura y la influencia de contaminantes.

Así, toda la investigación girará en torno a demostrar que lo que la teoría propuesta hasta el momento ha sido falsa y que las variables que se van a manejar, no tienen el comportamiento expresado en la teoría.

Para corroborar los planteamientos antes señalados, se manejará una serie de pruebas que buscan conducirnos a la validez o no de las hipótesis planteadas, así, se desarrolla la matriz de pruebas experimentales de la siguiente forma, considerando las variables encontradas como influyentes en el proceso y los parámetros encontrados y desarrollados en la literatura que al respecto existe.

II.- METODOLOGÍA

II.3 MATRIZ DE PRUEBAS:

Con base en lo anterior y teniendo en cuenta que esta tesis trata de la caracterización del fluido espumado de perforación (BPU) en presencia de contaminantes sólidos y líquidos, las pruebas a desarrollarse tendrán como parámetros esenciales las variables activas, por lo que se programan las matrices de prueba para lograr identificar acertadamente dicho fenómeno, por lo que se diseñan las matrices, siguiendo un modelo de pruebas de tipo factorial con modelos fijos para mas de dos niveles de interacción, aunque en el análisis de los efectos estadísticos se siga un modelo mas simplificado de diseño factorial, entonces, las pruebas se realizarán de la siguiente manera.

Para mirar la influencia de la concentración de aceite en la espuma:

No. De Pruebas.	Variables.			
	Calidad.	Concentración de Aceite.		
3	55	V1	V2	V3
6	60	V1	V2	V3
9	70	V1	V2	V3
12	80	V1	V2	V3
15	90	V1	V2	V3
18	95	V1	V2	V3

Tabla II.5. Matriz de pruebas para la contaminación con aceite diesel.

La propiedad a medir será:

Tiempo de Vida media de la espuma.

II.- METODOLOGÍA

Para medir la Influencia de la salmuera sobre la espuma, se realizarán:

No. De Pruebas.	calidad	Concentración de salmuera																													
		V1									V2									V3											
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
30	55																														
30	60																														
30	70																														
30	80																														
30	90																														
30	95																														

Tabla II.6. Matriz de pruebas para la contaminación con salmuera.

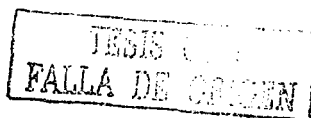
Aunque el formato anterior es muy completo, el formato que se manejará para la captación de los datos, estará dado por:

Calidad		V _{líquido} :		ml					
V _{espuma} :	800 ml	V _{espumante} :		ml					
V _{espuma}	V _{Sal}	V _{espuma}	V _{Sal}	t _{inicial}	t _{final}	V _{rompe}	V. media	V. media	
% Vol.	% Vol.	ml	ml	hrs	hrs	ml	horas	seg	
100	0	100	0						
98	2	98	2						
96	4	96	4						
94	6	94	6						
92	8	92	8						
90	10	90	10						
85	15	42.5	7.5						
80	20	40	10						
75	25	37.5	12.5						
70	30	35	15						

Tabla II.7. Formato de captación de datos para las pruebas

Teniendo como Variable controlable de medida:

Tiempo de vida media de la espuma.



II.- METODOLOGÍA

Para poder observar la vida media de las espumas, se desarrollará la medida a cada una de las seis calidades de espuma que se están manejando.

Teniendo en cuenta que se propone realizar la medición de cada una tres veces, daría un total de pruebas calculado por:

- ✓ 54 Pruebas con aceite.
- ✓ 486 Pruebas con salmuera. (Teniendo en cuenta que para cada concentración de salmuera y la de aceite Diesel, se harán 9 diferentes porcentajes en volumen de contaminación).
- ✓ 54 Pruebas para espumas limpias. (Una por cada una de las anteriores).

Esto, da un total de 594 pruebas a realizar.

Las medidas de concentraciones definidas para cada una de las variables, están diseñadas para abarcar tres valores representativos, siendo el (V1) un valor relativamente pequeño, el (V2) un valor intermedio y el (V3) un valor relativamente alto.

Estos valores están por definirse en conjunto con las experiencias obtenidas en las operaciones, así como la capacidad existente en el aparato de pruebas que se emplee.

II.3.1. SUJETOS DE INVESTIGACIÓN:

Aunque el mismo título de la tesis indica el tipo de sujeto que se manejará en esta investigación, es necesario aclarar que se manejará un tipo de espuma rígida, con composición similar mostrada en la sección II.1. de este capítulo, teniendo la variación de diferentes propiedades, como la calidad de la espuma ya formada, el contenido de sal en la salmuera y por supuesto, la concentración de contaminantes que podría encontrar en las operaciones reales.

II.- METODOLOGÍA

II.3.2 PROGRAMACIÓN DE LAS PRUEBAS:

Las pruebas se desarrollarán en el laboratorio de fluidos de perforación de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y está programado el utilizar tres horas hábiles para el desarrollo de cada prueba, por lo que eso acumula 486 horas efectivas de trabajo.

Las variables a medir y las gráficas a obtener en estas pruebas serán:

- 1.- Tiempo de vida media de la espuma.
- 2.- Estabilidad de la espuma rígida.

Las concentraciones de sal y aceite denominadas por V1, V2 y V3 serán diseñadas conforme unas pruebas estáticas previas a diferentes calidades, esperando encontrar la saturación máxima de salmuera (cloruro de sodio o cloruro de Potasio), conforme se realice esta saturación, el V1 será una concentración relativamente baja, el V2 será una concentración tipo medio y el V3 será una concentración alta.

II.- METODOLOGÍA

II.4 REQUERIMIENTO DE MATERIALES:

VIDA MEDIA DE ESPUMA CON CONTAMINANTES (ACEITE).

PREPARACIÓN DEL LÍQUIDO BASE.

MATERIAL	CANTIDAD	UNIDAD
Agua	72	LTS
Bentonita	2160	Grs.
Sosa Cáustica	72	Grs.
Polímero	1080	Grs.
Espumante	1080	mLTS
Diesel	810	MLTS

Tabla II.8. Requerimientos de Materiales para las pruebas con aceite.

VIDA MEDIA DE ESPUMA CON CONTAMINANTES (SALMUERA).

PREPARACIÓN DEL LÍQUIDO BASE.

MATERIAL	CANTIDAD	UNIDAD
Agua	216	LTS
Bentonita	6.48	Kg.
Sosa Cáustica	216	Grs.
Polímero	3240	Grs.
Espumante	3240	mLTS
Salmuera	2430	mLTS

Tabla II.9. Requerimientos de materiales para las pruebas con salmuera.

II.- METODOLOGÍA

TOTALES

MATERIAL	CANTIDAD	UNIDAD
Agua	288	LTS
Bentonita	8.64	Kg.
Sosa Cáustica	288	Grs.
Polímero	4320	Grs.
Espumante	4320	mLTS
Salmuera	2430	mLTS
Diesel	810	mLTS

Tabla II.10. Requerimientos de materiales para las pruebas completas.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

CAPÍTULO III.

***CONJUNCIÓN DE
PROCEDIMIENTOS
TEÓRICOS.***

III.- CONJUNCIÓN DE PROCEDIMIENTOS TEÓRICOS.

El presente capítulo, es una conjunción de los procedimientos teóricos desarrollados para la determinación de la densidad y viscosidad de la espuma en presencia de diferentes tipos de contaminantes.

Dentro de los contaminantes líquidos y gaseosos, debe hacerse la distinción entre el manejo de aquellos que son miscibles con los componentes de la espuma y aquellos que no lo son. Las espumas, junto con sus contaminantes miscibles, se considera un sistema multicomponente pseudohomogéneo, por lo que todos sus contaminantes, se manejarán bajo esta perspectiva.

III.1. FRACCIONES COMPONENTES DE LA ESPUMA CONTAMINADA.

La fracción en volumen definido como F_p de cada componente a una presión y temperatura particular P y T , es el volumen de un componente individual a esa presión y temperatura, dividida en el volumen total de la mezcla a esas mismas condiciones.

$$\begin{aligned} F_{gp} &= \frac{V_{gp}}{V_{mp}} = \frac{V_{gp}}{V_{gp} + V_{fp} + V_{sp}} \\ F_{fp} &= \frac{V_{fp}}{V_{mp}} = \frac{V_{fp}}{V_{gp} + V_{fp} + V_{sp}} \\ F_{sp} &= \frac{V_{sp}}{V_{mp}} = \frac{V_{sp}}{V_{gp} + V_{fp} + V_{sp}} \end{aligned}$$

Donde:

Ec.- III.1 Los subíndices g, f, s, denotan el gas, líquido y sólido respectivamente.

III.- CONJUNCIÓN DE PROCEDIMIENTOS TEÓRICOS

La suma de las fracciones en volumen es la unidad, así:

$$F_{gp} + F_{fp} + F_{sp} = 1$$

Ec.- III.2

Contaminantes miscibles con los componentes de la espuma.

Dentro de estos, se encuentra las salmueras y el mismo gas de formación, sin embargo, el tratamiento de todos los contaminantes de la espuma (miscibles) se hace con la perspectiva de un sistema multicomponente pseudohomogéneo.

TESIS CMT
FALLA DE CHILEN

III.2. CÁLCULO DE PROPIEDADES FÍSICAS CON CONTAMINANTES.

III.2.1. Densidad:

Para un sistema multifásico pseudohomogéneo, la densidad puede ser representada de la siguiente forma:

$$\rho_M = \frac{1}{\sum \frac{c_{wi}}{\rho_i}}$$

Ec.- III.3

O de otra forma:

$$\rho_M = \sum c_{vi} \rho_i$$

Ec.- III.4

Donde:

- ρ_M = Es la densidad del sistema multicomponente pseudohomogéneo a una presión y Temperatura.
- ρ_i = Es la densidad del componente o fase i a una presión y Temperatura determinada.
- C_{wi} = Fracción en peso del componente o fase i.
- C_{vi} = Fracción en volumen del componente o fase i.

En este caso, el sistema multicomponente pseudohomogéneo será la espuma con los contaminantes miscibles en ella, y los componentes o fases, serán el líquido y el gas.

Dentro de cada uno de los componentes o fases, hay formas para determinar sus densidades, máxime cuando estas son el producto de la unión de varios componentes que se encuentran en una misma fase.

III.- CONJUNCIÓN DE PROCEDIMIENTOS TEÓRICOS

III.2.1.1. Fase gas.

Dentro de esta fase, se pueden hacer varias consideraciones, referentes sobre todo a la ecuación de estado que determina el comportamiento de la mezcla de gases, en este trabajo, se manejará para la determinación de la densidad y la viscosidad, la ley de gases ideales y la ley de gases reales.

Los componentes en esta mezcla de gases, pueden dividirse básicamente en dos, los gases hidrocarburos o gas natural y los gases no hidrocarburos.

Sobre el rango de presión encontrados en la mayoría de las operaciones de bajo-balance, es adecuado asumir que la fase gaseosa del fluido de perforación actúa como un gas ideal y que las fases líquidas y sólidas son incompresibles¹ esto es, si V_o es el volumen de un componente a la presión P_o (Psia) y T_o (°R) entonces, para calcular estos volúmenes a otras condiciones de presión (P) y temperatura (T), se tiene:

$$\begin{aligned} V_{gp} &= V_{go} \left(\frac{P_o}{P} \right) \left(\frac{T}{T_o} \right) \\ V_{fp} &= V_{fo} = V_f \\ V_{sp} &= V_{so} = V_s \end{aligned}$$

Ec.- III.5

considerando la fracción en volumen de la fase gaseosa primero y sustituyendo la ecuación (III.5) en la ecuación (III.1) se obtiene:

$$F_{gp} = \frac{V_{go} \left(\frac{P_o}{P} \right) \left(\frac{T}{T_o} \right)}{V_{go} \left(\frac{P_o}{P} \right) \left(\frac{T}{T_o} \right) + V_f + V_s}$$

Ec.- III.6

¹ la suposición de un gas ideal puede ser cambiada si es necesario, considerando z, el factor de desviación de gas

III.- CONJUNCIÓN DE PROCEDIMIENTOS TEÓRICOS

De esto, la fracción de gas a la presión está dada por:

$$F_{gp} = \frac{F_{go}}{F_{go} + (F_{fo} + F_{so}) \left(\frac{P}{P_o} \right) \left(\frac{T_o}{T} \right)} = \frac{F_{go}}{F_{go} + (1 - F_{go}) \left(\frac{P}{P_o} \right) \left(\frac{T_o}{T} \right)} \quad \text{Ec.- III.7}$$

Similarmente, para las fracciones en volumen del líquido y del sólido se tiene:

$$F_{fp} = \frac{F_{fo}}{(1 - F_{go}) + F_{go} \left(\frac{P_o}{P} \right) \left(\frac{T_o}{T} \right)} \quad \text{Ec.- III.8}$$

$$F_{sp} = \frac{F_{so}}{(1 - F_{go}) + F_{go} \left(\frac{P_o}{P} \right) \left(\frac{T_o}{T} \right)} \quad \text{Ec.- III.9}$$

Gases Ideales.

Definiendo la densidad del gas ideal como:

$$\rho = \frac{PM_a}{RT} \quad \text{Ec.- III.10}$$

Donde:

- ρ = Densidad del gas.
- P = Presión absoluta del sistema.
- T = Temperatura absoluta del sistema.
- R = Constante de los gases.
- M_a = Peso molecular aparente de la mezcla de gases.

Así, el peso molecular aparente, se define como la sumatoria de los pesos moleculares de cada componente del gas (M_i), multiplicado por fracción molar (Y_i):

III.- CONJUNCIÓN DE PROCEDIMIENTOS TEÓRICOS

$$M_a = \sum_j Y_j M_j$$

Ec.- III.11

Donde la fracción molar se puede hallar bien sea por la ley de las presiones parciales de Dalton, que postula que la presión total ejercida por una mezcla de gases es igual a la suma de las presiones ejercidas por cada componente, luego, la fracción molar sería:

$$\frac{P_j}{P} = \frac{n_j}{\sum_j n_j} = \frac{n_j}{n} = Y_j$$

Ec.- III.12

donde:

P_j = Presión Ejercida por el componente j

P = Presión total del sistema.

n_j = Número de moles del componente j

n = Número de moles totales.

O por la ley de volúmenes parciales de Amagat, que postula que el volumen total ocupado por una mezcla de gases, es igual a la suma de los volúmenes que los componentes puros podrían ocupar a la misma presión y temperatura, de esta forma, la fracción molar sería:

$$\frac{V_j}{V} = \frac{n_j}{n} = Y_j$$

Ec.- III.13

donde:

V_j = Volumen Ejercido por el componente j

V = Volumen total del sistema.

n_j = Número de moles del componente j

n = Número de moles totales.

La compresibilidad finita de la fase gaseosa en una espuma, significa que su densidad incrementa con el incremento de presión. La presencia del líquido incompresible y la fase

III.- CONJUNCIÓN DE PROCEDIMIENTOS TEÓRICOS

sólida, significa que la densidad no cambia directamente con la presión, como podría ser el caso para un gas ideal. Denotando la densidad de la mezcla a la presión, P , por ρ_{mp} y el volumen ocupado por una masa fijada de la mezcla a la presión como V_{mp} , entonces:

$$\rho_{mp} = \rho_{mo} \left(\frac{V_{mo}}{V_{mp}} \right)$$

Ec.- III.14

Asumiendo que la fase gaseosa obedece la ley ideal de los gases y que la fase líquida y la fase gaseosa son incompresibles, se obtiene:

$$\rho_{mp} = \frac{\rho_{mo} (V_{go} + V_f + V_s)}{V_{go} \left(\frac{P_o}{P} \right) \left(\frac{T}{T_o} \right) + V_f + V_s} = \frac{\rho_{mo} V_{mo}}{V_{mo} F_{fo} + V_{mo} F_{so} + V_{mo} F_{go} \left(\frac{P_o}{P} \right) \left(\frac{T}{T_o} \right)}$$

Ec.- III.15

Finalmente:

$$\rho_{mp} = \frac{\rho_o}{1 - F_{go} \left(1 - \frac{P_o}{P} \frac{T}{T_o} \right)}$$

Ec.- III.16

Nota:

Las condiciones conocidas o anteriores, son las de P_o y T_o , las nuevas condiciones están determinadas por P y T .

Gases Reales.

Definiendo la densidad del gas real como:

$$\rho = \frac{PM_a}{ZRT}$$

Ec.- III.17

III.- CONJUNCIÓN DE PROCEDIMIENTOS TEÓRICOS

en el caso de gases reales, el manejo de una mezcla de gases, se puede realizar, calculando el peso molecular aparente, de la misma forma que para gases ideales, además, calculando el factor de compresibilidad (Z), siguiendo un método muy parecido para el cálculo de este factor para un solo componente (Ley de estados correspondientes), así, las propiedades críticas se reemplazan por las propiedades pseudocríticas, que son definidas como:

$$T_{pc} = \sum_j Y_j T_{cj} \quad \text{y} \quad P_{pc} = \sum_j Y_j P_{cj} \quad \text{Ec.- III.18}$$

Donde:

- T_{pc} = Temperatura pseudocrítica ($^{\circ}\text{R}$).
- T_{cj} = Temperatura crítica del componente j ($^{\circ}\text{R}$).
- Y_j = Fracción molar de j.
- P_{pc} = Presión pseudocrítica (Psia).
- P_{cj} = Temperatura crítica del componente j (Psia).

La temperatura y presión crítica de cada componente, pueden ser halladas en tablas donde se encuentren propiedades físicas de los componentes de la mezcla.

Muchas veces, los componentes existentes en la mezcla de gases no son conocidas, sin embargo, una de las relaciones más comunes de encontrar en las mediciones de campo es la gravedad específica, definida como la relación entre la densidad del gas en superficie y la densidad del aire. Se puede relacionar también, con los pesos moleculares del gas y del aire. Que según la composición normal del aire es, de (29 Lbm/lbmol). Entonces, la gravedad específica es:

$$\gamma_g = \frac{\rho_g}{\rho_{aire}} = \frac{M_u}{29} \quad \text{Ec.- III.19}$$

Con esta, se puede hallar la presión y temperatura pseudocrítica de la siguiente forma:

III.- CONJUNCIÓN DE PROCEDIMIENTOS TEÓRICOS

$$P_{pc} = 756.8 - 131.0\gamma_g - 3.6\gamma_g^2$$

Ec.- III.20

Y

$$T_{pc} = 169.2 + 349.5\gamma_g - 74.0\gamma_g^2$$

Ec.- III.21

Con la presión y Temperatura pseudocrítica, se procede a calcular la temperatura y presión pseudoreducida, de la misma forma que se correlaciona para un componente puro, así:

$$T_{pr} = \frac{T}{T_{pc}}$$

y

$$P_{pr} = \frac{P}{P_{pc}}$$

Ec.- III.22

Donde:

T_{pr} = Temperatura pseudoreducida.

T = Temperatura absoluta del sistema (°R).

T_{pc} = Temperatura pseudocrítica (°R).

P_{pr} = Presión pseudoreducida.

P = Presión absoluta del sistema (Psia).

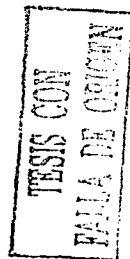
P_{pc} = Presión pseudocrítica (Psia).

Existe un método alternativo para el cálculo de las propiedades pseudocríticas, el cual debería ser usado para gases con gravedades específicas mayores a 1.0%, el cual viene extensamente desarrollado en la literatura².

El factor de compresibilidad, para gases naturales, ha sido correlacionado usando las propiedades pseudoreducidas, éstas, son presentadas en gráficas como la desarrollada por (Standing y Katz, 1942), las cuales también se encuentran junto con las tablas de propiedades físicas para algunos elementos puros³. También se han desarrollado algunas ecuaciones para representar la carta del factor z de Standing y Katz, siendo la desarrollada

² Ver por ejemplo, McCAIN, W. Jr., "The properties of petroleum fluids" segunda edición, Pennwell Books, 1990, Tulsa Oklahoma. Apéndice B, pp 509-510.

³ Idem. Pp 112,113.



III.- CONJUNCIÓN DE PROCEDIMIENTOS TEÓRICOS

por Dranchuk Abou-Kassem la que duplica dicha carta más cercanamente, teniendo un error absoluto promedio de 0.6%, y de 3% para altas presiones y temperaturas ($P_{pr} = 30$ y $T_{pr} = 2.8$). Dicha ecuación está dada por:

$$Z = 1 + \left(A_1 + \frac{A_2}{T_{pr}} + \frac{A_3}{T_{pr}^2} + \frac{A_4}{T_{pr}^3} + \frac{A_5}{T_{pr}^4} \right) \rho_{pr} + \left(A_6 + \frac{A_7}{T_{pr}} + \frac{A_8}{T_{pr}^2} \right) \rho_{pr}^2 - A_9 \left(\frac{A_7}{T_{pr}} + \frac{A_8}{T_{pr}^2} \right) \rho_{pr}^5 + A_{10} \left(1 + A_{11} \rho_{pr}^2 \right) \left(\frac{\rho_{pr}^2}{T_{pr}^3} \right) \cdot EXP(-A_{11} \rho_{pr}^2)$$

Ec.- III.23

Donde:

$$\rho_{pr} = 0.27 \left[\frac{P_{pr}}{Z T_{pr}} \right]$$

Las constantes de esta ecuación vienen determinadas por:

$A_1 = 0.3265$	$A_7 = -0.7361$
$A_2 = -1.0700$	$A_8 = 0.1844$
$A_3 = -0.5339$	$A_9 = 0.1056$
$A_4 = 0.01569$	$A_{10} = 0.6134$
$A_5 = -0.05165$	$A_{11} = 0.7210$
$A_6 = 0.5475$	

El rango de aplicabilidad es de:

$$0.2 \leq P_{pr} \leq 30 \quad \text{para} \quad 1.0 \leq T_{pr} \leq 3.0 \quad \text{y}$$

$$P_{pr} < 1.0 \quad \text{para} \quad 0.7 < T_{pr} < 1.0$$

Es de tener en cuenta que la mezcla que se produciría con la fase gaseosa de la espuma - que es nitrógeno usualmente- produciría una mezcla con un alto contenido de un gas no-hidrocarburo (el nitrógeno), luego, la presencia de éste gas, produce una variación en la Z

III.- CONJUNCIÓN DE PROCEDIMIENTOS TEÓRICOS

calculada anteriormente de aproximadamente 1% por cada 5% de nitrógeno en el gas, por lo que ha de hacerse la corrección necesaria para la concentración que se tenga después de la entrada del gas. Además, también han de realizarse correcciones dependiendo de la entrada de otros gases no hidrocarburos, por lo que dado el caso, deben hacerse las correcciones respectivas⁴.

Para el funcionamiento de las fracciones de cada fase incluyendo la del gas que se comporta como real, desde un punto determinado de P y T a otro de P_o y T_o, sería un procedimiento idéntico al realizado con el gas ideal, solo que incluyendo la relación de las desviaciones del gas real, así, las fracciones serían:

$$F_{gp} = \frac{F_{go}}{F_{go} + (F_{fo} + F_{so}) \left(\frac{P}{P_o} \right) \left(\frac{T_o}{T} \right) \left(\frac{Z_o}{Z} \right)} = \frac{F_{go}}{F_{go} + (1 - F_{go}) \left(\frac{P}{P_o} \right) \left(\frac{T_o}{T} \right) \left(\frac{Z_o}{Z} \right)} \quad \text{Ec.- III.24}$$

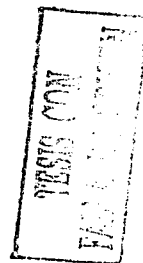
$$F_{fp} = \frac{F_{fo}}{(1 - F_{go}) + F_{go} \left(\frac{P_o}{P} \right) \left(\frac{T_o}{T} \right) \left(\frac{Z_o}{Z} \right)} \quad \text{Ec.- III.25}$$

$$F_{sp} = \frac{F_{so}}{(1 - F_{go}) + F_{go} \left(\frac{P_o}{P} \right) \left(\frac{T_o}{T} \right) \left(\frac{Z_o}{Z} \right)} \quad \text{Ec.- III.26}$$

Finalmente:

$$\rho_{mp} = \frac{\rho_o}{1 - F_{go} \left(1 - \frac{P_o}{P} \frac{T}{T_o} \frac{Z}{Z_o} \right)} \quad \text{Ec.- III.27}$$

⁴ Para ver dicho procedimiento, ver: McCAIN, W. Jr., "The properties of petroleum fluids" segunda edición, Pennwell Books, 1990, Tulsa Oklahoma. Pp 120,122.



III.- CONJUNCIÓN DE PROCEDIMIENTOS TEÓRICOS

III.2.1.2.- Fase líquida.

Al manejar como líquidos miscibles en las espumas, nos referimos a las aguas de formación, comúnmente denominadas salmueras, por el alto contenido de sales disueltas dentro de ellas. En muchos caso, se considera al líquido como incompresible, sin embargo, no hay que obviar la variación de la densidad debido al contenido de sales disueltas en la misma y el factor volumétrico de formación de las salmueras, así.

Efecto de la salinidad en la densidad de la salmuera:

La densidad de la salmuera a condiciones estándar (14,7 Psia y 60 °F), está influenciada por la cantidad de sólidos disueltos en la misma, esta relación ha sido matemáticamente expresada como:

$$\rho_w = 62.368 + 0.438603.S + 1.60074.(10^{-3}).S^2$$

Ec.- III.28

Donde:

S = Es la salinidad en porcentaje en peso de sólidos.

ρ_w = Es la densidad de la salmuera a condiciones estándar (lb/STft³).

Esta ecuación, presenta el problema que usualmente el contenido de sales disueltas en el agua, se reportan en partes por millón (ppm). Por lo que la relación vendría dada por:

$$S = C_{ppm} * 10^{-4}$$

Ec.- III.29

Donde:

S = Es la salinidad en porcentaje en peso de sólidos.

C_{ppm} = Salinidad en ppm.

III.- CONJUNCIÓN DE PROCEDIMIENTOS TEÓRICOS

En las operaciones de campo, es común tomar la medición de la densidad de la salmuera presente en los pozos productores, o bien, reportar el porcentaje de sólidos presentes en la misma, en cualquiera de estos casos, es necesario tener en cuenta, para calcular la densidad a condiciones de yacimiento o a cualquier otra condición dentro del pozo, el factor volumétrico de formación del agua, así:

Factor volumétrico de formación de las salmueras:

Este factor, representa el cambio en volumen de la salmuera cuando es transportada desde las condiciones del yacimiento a la superficie. Las unidades de este factor, son barriles en yacimiento, sobre barriles de superficie a condiciones estándar, (bbl/STB). Se tiene en cuenta tres fenómenos que afectan el comportamiento del volumen al ascender a superficie:

- ✓ La evolución del gas disuelto en la salmuera cuando se reduce la presión.
- ✓ La expansión de la salmuera cuando la presión es reducida.
- ✓ La contracción de la salmuera, cuando se reduce la temperatura.

Para el caso del factor de formación del aceite, se tiene que el principal efecto que cambia el volumen del aceite, es la cantidad de gas disuelto en el mismo. Pero esta solubilidad, es considerablemente menor en el agua de formación, y tiene muy poco efecto dentro del factor de formación del agua.

La contracción y expansión debida a la reducción en temperatura y presión es pequeña, y usualmente, el factor de formación del agua es pequeño, raramente más grande que 1.06 (bbl/STB).

III.- CONJUNCIÓN DE PROCEDIMIENTOS TEÓRICOS

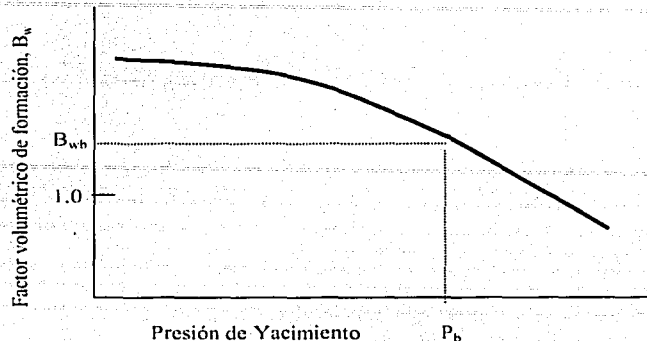


Figura III.1. Relación del factor volumétrico de formación para salmueras en función de la presión del yacimiento.

La figura es una típica relación del factor volumétrico de formación para una salmuera con la variación de la presión. La figura, muestra a la presión inicial del yacimiento sobre la presión del punto de burbuja del agua. Cuando la presión del yacimiento se reduce desde su presión inicial hasta la presión del punto de burbuja, el factor volumétrico de formación, se incrementa, por la expansión del agua debida a la reducción en la presión.

Una reducción en la presión del yacimiento bajo el punto de burbuja, resulta en la separación del gas desde el agua, hasta el espacio poroso. La pérdida del volumen de la salmuera debido a este proceso, es parcialmente contrarrestada por la expansión del agua debida a la reducción de la presión. Entonces, el factor volumétrico continua incrementándose cuando la presión del yacimiento es reducida.

Si la presión del yacimiento es reducida a la presión atmosférica, el máximo valor del factor del volumen de formación es alcanzado, en este punto la temperatura debe ser reducida a 60 °F para alcanzar un valor del factor volumétrico de exactamente 1.0 (bbl/STB).

Es de observar que este factor puede alcanzar valores menores que 1.0 (bbl/STB). Esto suele ocurrir en yacimientos de alta presión, donde la expansión de la salmuera, causada

III.- CONJUNCIÓN DE PROCEDIMIENTOS TEÓRICOS

por el decremento de la presión durante el viaje a la superficie es más grande que la contracción de la misma debida a la caída de temperatura y pérdida de gas.

Denominando al cambio de volumen, durante la reducción de la presión como (ΔV_{wp}) y al cambio de volumen debido a la reducción de la temperatura como (ΔV_{wT}). El factor volumétrico de formación del agua, está dado por:

$$B_w = (1 + \Delta V_{wp})(1 + \Delta V_{wT})$$

Ec.- III.30

Donde los cambios en los volúmenes pueden ser calculados por:

$$\Delta V_{wT} = -1.0001.(10^{-2}) + 1.33391.(10^{-4}).T + 5.50654.(10^{-7})T^2$$

Ec.- III.32

$$\Delta V_{wp} = -1.95301.(10^{-9})pT - 1.72834.(10^{-13})p^2T - 3.58922.(10^{-7})p - 2.25341.(10^{-10})p^2$$

Ec.- III.33

Donde:

T = Temperatura en °F.

P = Presión absoluta en Psia.

La estimación de este factor volumétrico, ha mostrado su precisión con respecto a los datos experimentales con un porcentaje de error promedio de uno por ciento. Las correlaciones desarrolladas para las variaciones de volumen, han mostrado su efectividad en un rango de sales disueltas desde 0 a 30%.

Así, la corrección de la densidad de la salmuera para darla a condiciones de yacimiento, viene dada por:

$$\rho_{wy} = \frac{\rho_w}{B_w}$$

Ec.- III.34

III.- CONJUNCIÓN DE PROCEDIMIENTOS TEÓRICOS

Donde:

- ρ_{wy} = Es la densidad de la salmuera a condiciones de yacimiento (lb/ft³).
 ρ_w = Es la densidad de la salmuera a condiciones estándar (lb/STft³).
 B_w = Factor volumétrico de formación (ft³/STft³).

Nota:

El B_w , es el mismo valor obtenido en (bbl/STB), pues el factor de multiplicación para la conversión a ft³ es el mismo en el numerador y el denominador, por lo que se cancelan entre sí.

De esta forma, las densidades de las fases independientes, se calcula según la mezcla de los componentes que se encuentran dentro de ella y se pueden reemplazar en las dos primeras ecuaciones, para poder calcular la densidad de la mezcla total.

Líquidos inmiscibles:

Como se ha mostrado en la variada literatura y comprobado en los análisis de laboratorio que para esta tesis se han realizado, la espuma no es capaz de mantener separada la fase líquida que corresponde al aceite, este se segrega de forma inmediata al entrar en contacto con la espuma, así que la presencia de este contaminante, será considerada como una fase independiente que en su régimen de flujo se comporta como un bache o flujo tapón.

Dentro de dicho bache, el aceite tendrá también variaciones de la densidad por lo cual, se debe tener en cuenta dicha variación:

Efecto de la densidad del aceite de formación:

Para determinar las propiedades físicas del aceite (concretamente la densidad), cuando se tiene un cambio en las condiciones de presión y temperatura, primero, se deben recordar las definiciones que se emplearán para ello, así, es muy usual encontrar como dato del aceite, la definición de gravedad API. Que es función de otra propiedad denominada

III.- CONJUNCIÓN DE PROCEDIMIENTOS TEÓRICOS

gravedad específica del líquido, La cual está definida como la relación entre la densidad del aceite y la densidad del agua, ambas tomadas a la misma temperatura y presión, así:

$$\gamma_o = \frac{\rho_o}{\rho_w} = \frac{\text{lb aceite/ft}^3 \text{ Aceite}}{\text{lb agua/ft}^3 \text{ Agua}}$$

Ec.- III.34

Entonces, la gravedad API, está definida como:

$$^{\circ}API = \frac{141.5}{\gamma_o} - 131.5$$

Ec.- III.35

Donde:

γ_o = Gravedad Específica tomada a presión atmosférica y con temperatura de 60 °F.

Nota:

A condiciones de presión atmosférica y temperatura de 60 °F, el agua usualmente posee una densidad de (62.37 lb/ft³)

Se debe considerar también, el factor volumétrico de formación para el aceite, el cual es el cambio de volumen que sufre el aceite durante su viaje a la superficie. Éste, a diferencia del factor volumétrico del agua, está primordialmente influenciado por el gas disuelto dentro de él, por lo que se define como el volumen de aceite de yacimiento, requerido para producir un barril de aceite a condiciones de superficie, incluyendo el gas disuelto, así:

$$B_o = \frac{\text{Volumen de Aceite + gas disuelto a condiciones de yacimiento}}{\text{Volumen de aceite a condiciones estándar}}$$

Ec.- III.36

Donde:

Sus unidades vienen expresadas en barriles a condiciones de yacimiento sobre barriles a condiciones estándar (bbl/STB).

III.- CONJUNCIÓN DE PROCEDIMIENTOS TEÓRICOS

Existen varias formas de encontrar este factor volumétrico del aceite, dependientes de los tipos de datos que se posean para ello, ya sean datos de campo, datos de estudios de los fluidos del yacimiento o por medio de correlaciones, las cuales, están extensamente explicadas en la literatura⁵

Así, la corrección de la densidad del aceite para darla a condiciones de yacimiento, viene dada por:

$$\rho_{oy} = \frac{\rho_o}{B_o}$$

Ec.- III.37

Donde:

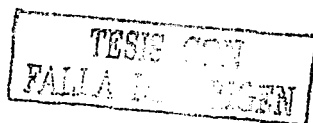
- ρ_{oy} = Es la densidad del aceite a condiciones de yacimiento (lb/bbl).
 ρ_o = Es la densidad del aceite a condiciones estándar (lb/STB).
 B_o = Factor volumétrico del aceite (bbl/STB).

III.2.2. Viscosidad:

Esta propiedad es la medida de la resistencia al flujo ejercida por un fluido, la viscosidad dinámica, usualmente se expresa en centipoises que representa (g masa/ (100 seg.cm)).

Según los diferentes estudios desarrollados hasta el momento, la dependencia de la viscosidad de las espumas, está relacionada con la calidad de la misma, la viscosidad del líquido, la presión y la temperatura por lo que se han desarrollado varias ecuaciones para modelar dicho comportamiento, las relaciones para la viscosidad de la espuma, han sido mostradas en el marco teórico de la tesis, por lo que se remite al lector a esta parte, para su revisión. Para los contaminantes miscibles, se pueden dar variaciones tanto en la calidad de la espuma como en la viscosidad del líquido, esto debido a la entrada de gas y/o entrada de salmuera de la formación. Por lo que se analizará dicha variación como la

⁵Idem. Capítulos 9-11.



III.- CONJUNCIÓN DE PROCEDIMIENTOS TEÓRICOS

directa responsable de la variación de la viscosidad de nuestro sistema multicomponente pseudohomogéneo (espuma).

III.2.2.1. Fase gas.

Como no existe ninguna reacción entre los gases presentes en esta fase, al volumen del gas inerte utilizado para la elaboración de la espuma, se le adicionará el volumen de gas que entre en la operación, el problema es determinar el volumen de cada componente a las diferentes presiones y temperaturas durante el asenso a la superficie, de nuevo, se hará la consideración para gases ideales y gases reales.

Gas Ideal.

Cuando se asume este tipo de comportamiento de gases, se puede utilizar la relación de las ecuaciones de Charles y Boyle, para describir su comportamiento cuando se cambian la temperatura y la presión, obteniendo la ecuación.

$$\frac{P_g V_g}{T} = \frac{P_o V_{go}}{T_o}$$

Ec.- III.38

Donde:

- V_g = Volumen de gas a una P y T (ft^3).
- V_{go} = Volumen de gas a una P_o y T_o (ft^3).
- P = Presión absoluta del sistema en el punto de referencia 1 (Psia).
- P_o = Presión absoluta del sistema en el punto de referencia 2 (Psia).
- T = Temperatura absoluta del sistema en el punto de referencia 1 ($^{\circ}\text{R}$).
- T_o = Temperatura absoluta del sistema en el punto de referencia 2 ($^{\circ}\text{R}$).

La ecuación (34) Puede re-escribirse como:

$$V_{gP,T} = V_{go} \left(\frac{P_o}{P} \right) \left(\frac{T}{T_o} \right)$$

Ec.- III.39

III.- CONJUNCIÓN DE PROCEDIMIENTOS TEÓRICOS

Con esta relación, se puede hallar el volumen del gas que entra al pozo, se puede predecir desde las condiciones de fondo del pozo hasta la superficie.

Así, el volumen de entrada, como el volumen del gas inerte (nitrógeno) que lleva la espuma, son calculados y se puede determinar su calidad.

Nota:

La medida del gas que entra de la formación, puede hacerse revisando el volumen de gas de entrada en el separador de la operación, comparándolo con el volumen de gas de entrada a la tubería de perforación (recuérdese que volumen es ritmo de flujo dividido entre el área transversal al flujo), así, la diferencia entre uno y otro será el volumen de entrada de gas de formación, con lo cual se podría realizar el procedimiento de cálculo de la nueva calidad de la espuma.

Gas real.

Tomando en consideración este tipo de comportamiento de los gases, se puede adicionar el factor de desviación de los gases a las relaciones establecidas anteriormente, por lo que, la relación quedaría:

$$\frac{P_g V_g}{Z T} = \frac{P_o V_{go}}{Z_o T_o}$$

Ec.- III.40

Donde:

Z = Factor de desviación del gas a P y T.

Z_o = Factor de desviación del gas a P_o y T_o.

De igual forma, la ecuación (36) Puede re-escribirse como:

$$V_{gp,T} = V_{go} \left(\frac{P_o}{P} \right) \left(\frac{T}{T_o} \right) \left(\frac{Z}{Z_o} \right)$$

Ec.- III.41

III.- CONJUNCIÓN DE PROCEDIMIENTOS TEÓRICOS

Así, el volumen de los gases que se comportan con esta ecuación de estado, puede calcularse y por ende, la nueva calidad de la espuma también.

Para ver que porcentaje de gas entra al pozo, ver la nota, para gases ideales.

III.2.2.1. Fase líquida.

Como la otra variable en la viscosidad de la espuma, depende de la viscosidad de la fase líquida, es necesario tener una medida acertada de esta variable. Así, conocer la viscosidad del fluido base, es necesaria para los cálculos iniciales de la viscosidad de la espuma pura, sin embargo, para el cálculo la viscosidad de la espuma cuando se encuentra contaminada, es necesaria la realización de pruebas experimentales para su apropiada descripción, pero este objetivo está fuera de la presente tesis, por lo que solo se hará una aproximación de su cálculo con respecto a lo que se reporta en la literatura.

Viscosidad de mezcla de líquidos entre sí.

Este sería el caso de la viscosidad debido a la entrada de agua de formación o salmueras, la variación de la viscosidad de este tipo de líquido es como sigue:

$$f(\mu_m) = \sum x_i f(\mu_i)$$

Ec.- III.42

donde la función de la viscosidad estaría dada por cualquiera de las siguientes igualdades:

$f(\mu) = \mu = \frac{1}{\mu} = L_n(\mu)$ y x_i sería entonces, la fracción en volumen, en peso o la molar respectivamente.

III.- CONJUNCIÓN DE PROCEDIMIENTOS TEÓRICOS

En este caso, la literatura reporta una forma de calcular el cambio en la viscosidad debido a los cambios de presión, por lo que se remite al lector a dicho procedimientos extensamente explicados⁶.

Nota:

Las expresiones anteriores, han sido desarrolladas para el caso en el cual, los líquidos son miscibles entre sí. Para cuando no son miscibles, el fluido se comporta como un bache del componente Inmiscible.

⁶ Para ver dichos procedimientos, ver: McCain, W. Jr., "*The properties of petroleum fluids*" segunda edición, Pennwell Books, 1990, Tulsa Oklahoma. Pp 236-237, 328-333, 456-460, 527-528.

CAPÍTULO IV.

ANÁLISIS ESTADÍSTICO.

IV.- ANÁLISIS ESTADÍSTICO.

IV.1 VARIABLES DE INFLUENCIA:

En el presente capítulo, se analizarán las pruebas desarrolladas, con base en el diseño de pruebas factorial. La técnica de diseño factorial, o cualquier otro modelo de investigación aplicada, está directamente afectada por el número de variables a estudiar; a mayor número de variables, se incrementa substancialmente el número de ensayos de laboratorio, al tiempo que se dificulta la interpretación de resultados, pudiéndose llegar al caso de producir conclusiones erróneas.

El éxito de una investigación depende, en gran parte, de la certeza y la habilidad que se tenga para seleccionar el mínimo de variables de influencia que representa el sistema. Específicamente para esta investigación se seleccionan las variables de influencia a partir de las experiencias obtenidas en las experimentaciones anteriores de la estabilidad de las espumas; éstas son:

- ⇒ ***Calidad de la espuma.***
- ⇒ ***Concentración de sal (NaCl) en la salmuera.***
- ⇒ ***Porcentaje de contaminación en la Espuma.***
- ⇒ ***Porcentaje de contaminación de aceite Diesel.***

La temperatura no se considera como variable de influencia, pues, el tiempo de vida media va a ser medida a temperatura ambiente y esta será la temperatura a la cual recibirá todo el tratamiento la espuma.

La presión durante las pruebas siempre será la atmosférica.

Variable dependiente

Una vez se ha terminado de desarrollar los procedimientos de elaboración de pruebas, se tienen datos de Tiempo de vida media (vs.) Contaminación en volumen de salmuera, para diferentes calidades de espumas y a diferentes concentraciones de sal en la salmuera. Es decir, nuestra variable dependiente, será el tiempo de vida media de la espuma.

IV.2 RESULTADOS ESTADÍSTICOS DE LAS PRUEBAS:

IV.2.1. Diseño de las pruebas de laboratorio

Las pruebas de laboratorio se diseñaron para obtener respuestas confiables y reproducibles del efecto de las variables independientes (calidad, concentración de (NaCl) en la salmuera y porcentaje en volumen de contaminación) sobre la variable dependiente (tiempo de vida media de la espuma). A continuación se hará una exposición del diseño de estas pruebas y posteriormente se realizará el análisis respectivo de los resultados obtenidos.

Definiciones fundamentales

- ⇒ **Variable:** Uno de los aspectos que se han de estudiar en el experimento
- ⇒ **Nivel:** El valor correspondiente a una variable, frecuentemente, para un diseño factorial de la forma 2^k , se habla de niveles "altos" o "bajos", correspondiendo "alto" al mayor valor y "bajo" al menor valor. Cuando se relaciona un diseño experimental con un (-) se está indicando un nivel bajo y por lo tanto un (+) indicará un nivel alto. El presente tratamiento estadístico, tendrá la forma del tratamiento 2^k , sin embargo, las pruebas realizadas, tienen mas de dos niveles de tratamiento, esto con el objeto de contribuir al desarrollo de expresiones que puedan simular acertadamente el comportamiento de la variable dependiente frente a las independientes. El tratamiento estadístico 2^k es muy útil por su sencillez de aplicación y por que cumple con el objetivo primordial del análisis estadístico de proveer una orientación de los efectos producidos por las diferentes variables independientes, sobre la variable dependiente.
- ⇒ **Tratamiento:** Es un solo nivel asignado a una sola variable durante un experimento.
- ⇒ **Bloque:** Es la porción de material experimental que es más homogénea dentro de sí misma.

⇒ **Diseño experimental:** Es el plan formal para manejar el experimento.

IV.2.2. Diseño experimental

Esta investigación busca detectar el grado de influencia y relaciones permanentes que existan entre calidad, concentración de (NaCl) en la salmuera y porcentaje en volumen de contaminación con respecto a la variable dependiente en estudio. Para lo cual se recurrió a un programa de diseño estadístico que permite el estudio simultáneo de las variables y la obtención del efecto que tendría su varianza sobre las variables dependientes; este modelo es denominado "**modelo fijo de la técnica de diseño factorial fraccionario a dos niveles**". Como se explicó anteriormente, se selecciona dicho modelo estadístico, por la sencillez de su manejo y por proveer las herramientas cuantitativas de las interacciones entre las diferentes variables en estudio en la presente tesis, sin omitir, que para obtener una precisión más grande en cuanto a la modelación matemática de los fenómenos, las pruebas experimentales, fueron ampliadas para cubrir mas de dos niveles.

Nota:

A pesar que las pruebas se hayan realizado con una cantidad mayor de niveles, no omite la posibilidad de analizar las interacciones con el procedimiento arriba descrito.

Hay muchas ventajas al utilizar este tipo de diseño factorial.

- Una gran cantidad de variables pueden estudiarse al mismo tiempo, haciendo posible obtener una visión de sus efectos simultáneos sobre respuestas de interés.
- Se pueden establecer claramente las interacciones entre las variables, factor que es imposible al utilizar el procedimiento tradicional de ensayar la influencia de una variable independiente, dejando fijas las demás o que presenta complicaciones, al manejar interacciones por encima de dos niveles.
- Esta es una herramienta de comprobada eficiencia y utilidad en diversos tipos de investigación y ha mostrado un valor especial en la industria.

IV.- ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Esta técnica permite analizar mas efectivamente el efecto simple de una sola variable, al comparar promedios contra promedios; en términos mas formales, se necesita comparar el promedio proveniente a un nivel de una variable dependiente contra el promedio resultante a otro nivel de aquella variable independiente. En la siguiente figura se puede apreciar este aspecto:

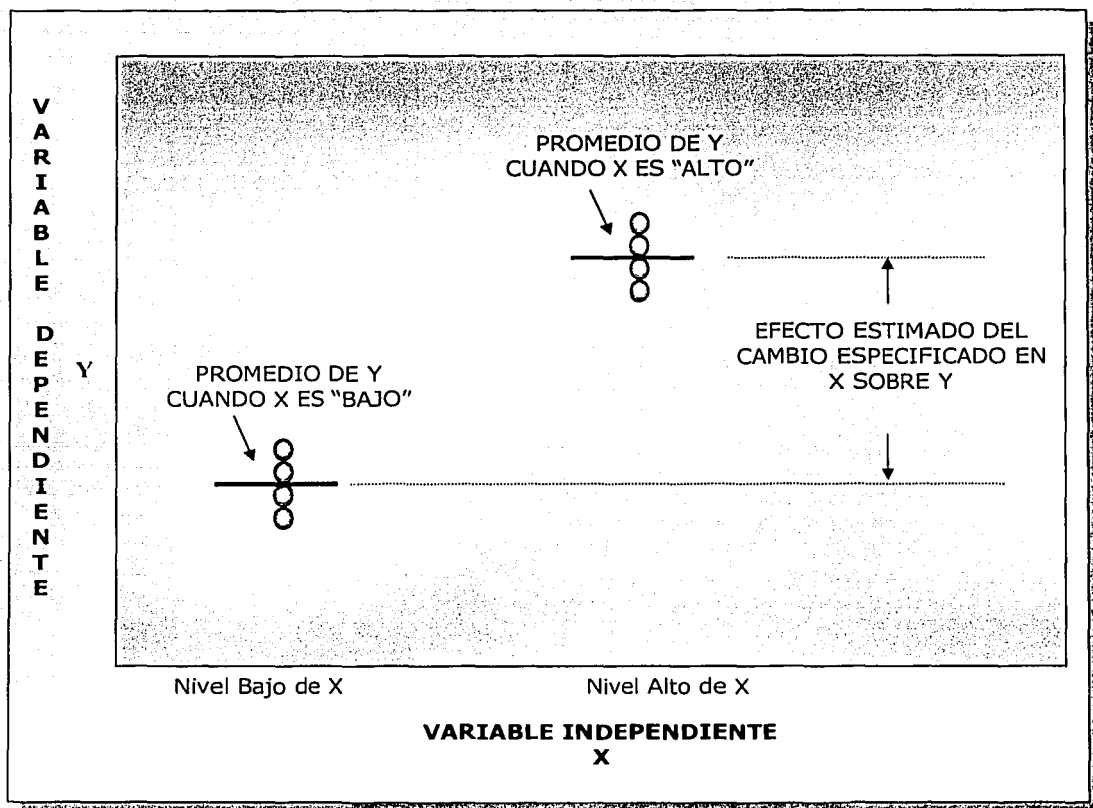


Figura IV.1. Comparación de promedios contra promedios para una variable independiente.

IV.- ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Resultados de las pruebas:

Como se expuso en el capítulo de la metodología (capítulo II), se desarrollaron diferentes pruebas variando calidad, porcentaje de contaminación con salmuera y la concentración de sal (NaCl) en la salmuera así como contaminando con aceite, pero, en el desarrollo de las pruebas, se realizaron algunos cambios conforme se desarrollaba la metodología propuesta, los cambios realizados son:

Los diferentes niveles propuestos para calidad en porcentaje, eran: (55, 60, 70, 80, 90 y 95 por ciento), estos fueron modificados, únicamente eliminando las pruebas para la última de estas calidades, la de 95 por ciento, ya que se tenían muchas posibles fuentes de error y desviación de las metodologías propuestas para la formación y medición de las muestras que lo convertían en un nivel con una indiscutible incertidumbre imposible de tomarse como medias correspondientes a las demás,

Por ende, se decidió eliminar dicho nivel y eliminar esta incertidumbre que no se presentó con los demás niveles de la variable calidad.

En las pruebas desarrolladas con aceite, se observó que la espuma no podía, por lo menos en estas pruebas estáticas, retener cualquier cantidad de este tipo de contaminante, observándose una segregación casi inmediata, imposible de obtener medidas acertadas de dicha segregación, debido a la rapidez presentada, luego, observando la inoperancia de dichas pruebas, se decide eliminar el programa de pruebas a desarrollar con aceite.

Por lo demás, el programa se desarrolló como el programado, realizándose tres repeticiones de cada experimento, lo cual, arroja un total de 450 pruebas desarrolladas de la siguiente forma:

Niveles de calidad	=	5
Niveles de porcentaje de contaminación con salmuera	=	10
Niveles de concentración de (NaCl) en la salmuera	=	3

IV.- ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Lo que conjugándolas, arroja 150 pruebas y teniendo en cuenta 3 repeticiones de cada una, se tiene un total de 450 Pruebas.

IV.2.2.1. Varianza muestral, desviación estándar muestral y coeficiente de variación muestral.

Estas, son las dos medidas mas importantes de variabilidad que existen, por lo que a continuación, se hará una breve exposición de su significado.

Definición:

Si $x_1, x_2, \dots, x_n$ es una muestra de n observaciones, entonces la varianza muestral es:

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}$$

Ec.- IV.1

La desviación estándar muestral, s , es la raíz cuadrada positiva de la varianza muestral.

Donde:

- s^2 = Varianza muestral (seg²).
- s = Desviación estándar muestral (seg).
- x_i = Muestra de la observación i .
- $\bar{x}$ = Es la media o el promedio aritmético de las observaciones realizadas con un juego idéntico de niveles de las variables.
- n = Número de repeticiones de una medida.

Las unidades de medición de la varianza muestral son iguales al cuadrado de las unidades con que se mide la variable dependiente, de esta manera, como la variable dependiente tiempo de vida media de la espuma está medida en segundos, las unidades de la varianza muestral y la desviación estándar muestral son (seg²) y (seg.) respectivamente.

IV.- ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Entre mas grande sea la variabilidad en los datos, mayor será la magnitud absoluta de las desviaciones $x_i - \bar{x}$. Puesto que la suma de las desviaciones $x_i - \bar{x}$ siempre es cero, se debe utilizar una medida de variabilidad que cambie las desviaciones negativas en cantidades no negativas. Elevar al cuadrado las desviaciones es el enfoque que se emplea en la varianza muestral. En consecuencia, si s^2 es pequeña, entonces, existe una variabilidad pequeña en los datos, pero si s^2 es grande, la variabilidad también lo es.

Otra forma de representar la ecuación (IV.1) solo en función de las muestras de las n observaciones (x_i) viene dada por:

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{\left(\sum_{i=1}^n x_i\right)^2}{n}}{n-1}$$

Ec.- IV.2

Ahora, en ocasiones es deseable expresar la variación como una fracción de la media, para hacer esto, se utiliza una medida adimensional de variación relativa, denominada **Coefficiente de variación muestral**. Cuya definición, viene dada por:

$$CV = \frac{s}{\bar{x}}$$

Ec.- IV.3

Donde:

- cv = Coeficiente de variación muestral (Fracción)
- s = Desviación estándar muestral (seg).
- $\bar{x}$ = Es la media o el promedio aritmético de las observaciones realizadas con un juego idéntico de niveles de las variables (seg).

Ahora bien, aplicando este análisis, al conjunto de datos obtenidos en las pruebas, se obtiene:

Para las pruebas con una salmuera de concentración de (NaCl) de 95000 ppm:

IV.- ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Calidad de la espuma.	Varianza Muestral (s^2) de la Pruebas con Salmuera de Concentración de 95000 ppm (seg ²).									
	Porcentaje de Concentración de Salmuera en la Espuma.									
	0	2	4	6	8	10	15	20	25	30
55	13,300	7,561	14,725	8,400	3,700	1,900	175	12	3	1
60	27,100	19,300	16,900	12,900	10,800	6,300	721	13	4	1
70	47,500	47,100	38,800	27,100	19,300	7,600	700	39	13	1
80	68,125	51,100	34,975	30,400	21,961	6,529	76	13	4	1
90	48,825	35,089	30,100	25,825	11,775	8,325	19	3	1	0

Tabla IV.1. Varianza muestral de las pruebas con salmuera de 95000 ppm (NaCl)

Calidad de la espuma.	Desviación Estándar Muestral (s) de la Pruebas con Salmuera de Concentración de 95000 ppm (seg).									
	Porcentaje de Concentración de Salmuera en la Espuma.									
	0	2	4	6	8	10	15	20	25	30
55	115.3256	86.9540	121.3466	91.6515	60.8276	43.5890	13.2288	3.4641	1.7321	1
60	164.6208	138.9244	130.0000	113.5782	103.9230	79.3725	26.8514	3.6056	2	1
70	217.9449	217.0253	196.9772	164.6208	138.9244	87.1780	26.4575	6.2450	3.6056	1
80	261.0077	226.0531	187.0160	174.3560	148.1924	80.8022	8.7178	3.6056	2	1
90	220.9638	187.3206	173.4935	160.7016	108.5127	91.2414	4.3589	1.7321	1	0

Tabla IV.2. Desviación estándar muestral de las pruebas con salmuera de concentración 95000 ppm (NaCl).

Calidad de la espuma.	Coeficiente de Desviación Muestral de la Pruebas con Salmuera de Concentración de 95000 ppm (porcentaje).									
	Porcentaje de Concentración de Salmuera en la Espuma.									
	0	2	4	6	8	10	15	20	25	30
55	2.64	2.399	4.05	4.1	3.64	3.64	4.76	9.62	5.25	4.35
60	3.10	3.057	3.49	3.95	4.99	6.42	8.98	10.3	5.88	6.25
70	3.38	3.977	4.42	5.12	6.1	7.25	7.39	6.94	6.44	5
80	3.47	3.511	3.51	4.31	5.67	6.6	6.27	5.72	4.88	5.26
90	4.19	4.268	4.68	6.23	5.96	8.13	6.51	5.59	5.56	0

Tabla IV.3. Desviación Estándar Muestral de las pruebas con salmuera de concentración de (NaCl) de 95000 ppm.

IV.- ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Los datos completos del análisis anterior para todas las pruebas, se observan en el anexo (E).

Es de notar que en todos los 150 análisis realizados, solo cinco de ellos, superaron el 10 por ciento de coeficiente de variación muestral, siendo el mayor de ellos de 14.29 por ciento alcanzado para las pruebas realizadas para una salmuera de 130000 ppm de sal y 25 por ciento de contaminación en la espuma. Lo que indica, que en todas las muestras, se tuvo una variación muy pequeña con respecto al promedio alcanzado en cada una de estas.

IV.2.3. Niveles de análisis de las variables independientes

Como se había dicho para el análisis estadístico, utilizando la técnica de diseño factorial requiere la aplicación de dos niveles de experimentación para cada variable a estudiar, registrándose, los cambios que ocurren para cada nivel sobre la variable dependiente. Los niveles para las variables de interés son:

VARIABLE	NIVEL ALTO	NIVEL BAJO
Calidad (%)	90	55
Concentración de (NaCl) en la salmuera (ppm)	160000	95000
Porcentaje en volumen de contaminación (%)	10	2

Tabla IV.4. Niveles de las variables independientes

Nota:

Nótese que en las pruebas desarrolladas en la metodología y las efectivamente realizadas en las pruebas experimentales, el nivel más alto encontrado para el porcentaje en volumen de contaminación, fue de 30 por ciento, sin embargo, como se analizará más extensamente en el capítulo siguiente, se considera el nivel más alto para el presente análisis, 10 por ciento de contaminación, por considerar que por encima de este, la espuma se abate casi inmediatamente, de igual forma, se tomó 90% de calidad como nivel más alto, debido a la inestabilidad presentada para una calidad de 95 por ciento.

IV.- ANÁLISIS ESTADÍSTICO

IV.2.4. Variable dependiente

Es la variable afectada por las variables independientes. En este proyecto, las variable dependiente es el tiempo de vida media de la espuma.

En este proyecto, se van analizar tres variables independientes, a las cuales por motivo de análisis y tabulación se le hacen las siguientes asignaciones:

<i>Calidad</i>	:	X_1
<i>Concentración de (NaCl) en la salmuera</i>	:	X_2
<i>Porcentaje de contaminación con salmuera</i>	:	X_3

Sin embargo, en el análisis de los resultados se estudia el porcentaje de control de la variable dependiente en cada prueba con respecto al valor de la variable dependiente cuando la espuma se encontraba totalmente limpia. Los valores que se tienen del tiempo de vida media para la espuma limpia se han determinado como (ver anexo B para datos completo)

$$T_{vml55} = 4238 \text{ (seg)}$$
$$T_{vml90} = 5258.33 \text{ (seg)}$$

La ecuación para encontrar el porcentaje de control en cada prueba es:

$$PC = \frac{TF - TI}{TI} * 100$$

Ec.- IV.4

Donde:

PC : Porcentaje de control

TF : Tiempo de vida media final, valor de la variable dependiente en cada prueba

TI : Tiempo de vida media de la espuma limpia, dependiendo la calidad.

IV.- ANÁLISIS ESTADÍSTICO

En general el porcentaje de control se refiere al porcentaje de variación del tiempo de vida media de la espuma a diferentes calidades, cuando esta es sometida a una contaminación con salmueras de diferentes concentraciones de (NaCl).

A continuación, se muestran los datos que se seleccionaron para el presente análisis del diseño factorial, en la primera parte, se muestra la matriz del diseño factorial para el presente análisis codificada, en la cual, se representan los dos niveles de estudio por medio de un (+1) para el nivel alto y un (-1) para el nivel bajo. En la segunda sección, se muestra la matriz sin codificar, es decir, con los valores de los respectivos niveles, para cada una de las variables independientes. En la tercera parte de la tabla, se muestran los valores obtenidos en las pruebas, cabe anotar que los valores dados como tiempos de vida media de la espuma, es el promedio de las tres repeticiones que se realizaron experimentalmente, y los porcentajes de control con respecto a los valores del tiempo de vida media para las espumas sin contaminación y a sus respectivas calidades.

Pruebas Seleccionadas	Matriz para el Diseño Codificado			Matriz para el Diseño sin Codificar			Tiempo de Vida Media de la espuma (segundos)	Porcentaje de control (porcentaje)
	X1	X2	X3	Calidad (%)	Sal en la Salmuera (ppm)	(%) Contaminación		
1	-1	-1	-1	55	95000	2	3625	14.46
2	+1	-1	-1	90	95000	2	4389	16.53
3	-1	+1	-1	55	160000	2	3360	20.72
4	+1	+1	-1	90	160000	2	3957	24.75
5	-1	-1	+1	55	95000	10	1197	71.76
6	+1	-1	+1	90	95000	10	1122	78.66
7	-1	+1	+1	55	160000	10	388	90.84
8	+1	+1	+1	90	160000	10	376	92.85

Tabla IV.5. Matriz de diseño para el análisis factorial.

En la última columna de la tabla (IV.2) se muestra el valor del porcentaje de control para cada prueba. Y en la figura (IV.2) se puede apreciar gráficamente este porcentaje de control para cada prueba.

IV.- ANÁLISIS ESTADÍSTICO

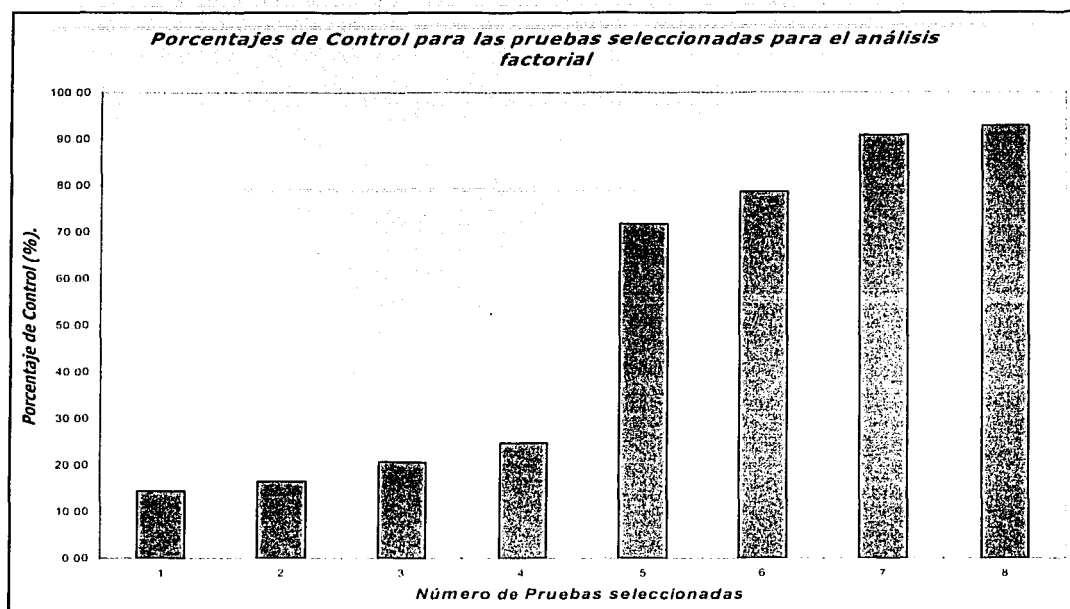


Figura IV.2. Porcentaje de control para cada juego de pruebas seleccionadas.

IV.2.5. Interacciones de las variables

El análisis factorial permite analizar los efectos de cada una de las variables independientes sobre la variable dependiente. Estos efectos son denotados como:

E_1 = Efecto de la variable X_1 (calidad) sobre la variable Y (Tiempo de vida media de la espuma)

E_2 = Efecto de la variable X_2 (concentración de (NaCl)) sobre la variable Y

E_3 = Efecto de la variable X_3 (Porcentaje de contaminación) sobre la variable Y

Pero una de las ventajas del diseño factorial es que no sólo se puede calcular el efecto promedio independiente de cada variable sino también la interacción entre las variables.

IV.- ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Para tener una apreciación física del significado de una interacción de dos variables, considérese las variables X_1 y X_2 . Si el efecto de cambiar la calidad es igual para los dos niveles de concentración de (NaCl) en la salmuera, se dice que no hay interacción de dos variables entre la calidad y la concentración de (NaCl), es decir, que la calidad y la concentración de (NaCl) actúan independientemente la una de la otra. De otra parte si el efecto del cambio de la calidad no es el mismo para ambos niveles de concentración de salmuera (o si el efecto del cambio de la concentración de (NaCl) no es la misma para ambas calidades), se dice que existe una interacción de dos variables entre la calidad y la concentración de (NaCl). En este caso el efecto de una variable depende del nivel del otro.

Como se está analizando un problema con tres variables, hay tres interacciones de dos factores: Calidad- Concentración de (NaCl) (E_{12}), Calidad- Porcentaje de Contaminación (E_{13}) y Concentración de (NaCl) - Porcentaje de Contaminación (E_{23}).

Como se puede notar existe una ultima interacción, y es la que existe entre las tres variables independientes (Calidad, Concentración de (NaCl), Porcentaje de Contaminación), y se denota como E_{123} .

Una forma de extraer los efectos simples más interacciones a partir de los datos es:

Primero, codificar los experimentos en una tabla con los signos + y - para denotar niveles altos y bajos de las variables. Multiplicar en cruz estas tres columnas en pares (X_1X_2 ; X_1X_3 ; X_2X_3) y posteriormente los tres en conjunto ($X_1X_2X_3$). Los signos de las multiplicaciones se obtienen siguiendo los principios del álgebra. Así, para dar origen a la columna X_1X_2 a partir de X_1 y X_2 , se tiene: $- * - = +$; $+ * - = -$; $- * + = -$; etc. Al final se construye una columna con los porcentajes de control.

IV.- ANÁLISIS ESTADÍSTICO

PRUEBA	X_1	X_2	X_3	X_1X_2	X_1X_3	X_2X_3	$X_1X_2X_3$	PORCENTAJE DE CONTROL
1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	14.46
2	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	16.53
3	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	20.72
4	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	24.75
5	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	71.76
6	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	78.66
7	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	90.84
8	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	92.85

Tabla IV.6. Matriz de cálculo para el análisis factorial.

Como se hicieron cuatro experimentos por nivel, el efecto se calcula con base en la siguiente ecuación:

$$E_i = [\Sigma(\text{Porcentaje de control a alto nivel}) - \Sigma(\text{Porcentaje de control a bajo nivel})] / 4$$

Ec.- IV.5

Donde, E_i es el efecto principal o efecto promedio total de la variables "i" sobre el tiempo de vida media de la espuma, en respuesta a la manipulación de "i" desde su nivel bajo hasta su nivel alto.

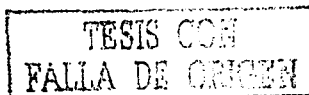
Todos los efectos posibles se pueden resumir en la siguiente tabla:

IV.- ANÁLISIS ESTADÍSTICO

SÍMBOLO	CÁLCULO	VALOR DEL EFECTO
E_1, (Efecto de la Calidad)	$= (16.53+24.75+78.66+92.85 - 14.46 - 20.72 - 71.76 - 90.84)/4$	3.753
E_2, (Efecto de la Concentración de (NaCl))	$= (20.72+24.75+90.84+92.85 - 16.53-14.46-71.76-78.66)/4$	11.938
E_3, (Efecto de porcentaje de contaminación)	$= (71.76 + 78.66+90.84+92.85 - 14.46-16.53-20.72-24.75)/4$	64.413
E_{12}, (Efecto de interacción Calidad-Concentración (NaCl))	$= (14.46+24.75+71.76+92.85 - 16.53-20.72-78.66-90.84)/4$	-0.733
E_{13}, (Efecto de interacción Calidad-porcentaje de contaminación)	$= (14.46+20.72+78.66+92.85 - 16.53-24.75-71.76-90.84)/4$	0.703
E_{23}, (Efecto de interacción concentración de (NaCl) - Porcentaje de contaminación)	$= (14.46+16.53+90.84+92.85 - 20.72-24.75-71.76-78.66)/4$	4.698
E_{123}, (Efecto de interacción Calidad-concentración (NaCl)- Porcentaje contaminación.)	$= (16.53+20.72+71.76+92.85 - 14.46-24.75-78.66-90.84)/4$	-1.713

Tabla IV.7. Efectos e interacciones.

Como se puede ver, en orden de importancia, las variables que mas influyen en la variación del tiempo de vida media son: Porcentaje de contaminación de la salmuera, concentración de (NaCl) en la salmuera. Con menos importancia están la interacción entre la concentración de (NaCl) en la salmuera y el porcentaje en volumen de contaminación, la calidad e interacción entre calidad y porcentaje de contaminación con salmueras. Casi sin ningún efecto se presentan calidad-concentración de (NaCl) en la salmuera y la combinación de efectos entre calidad-concentración de (NaCl) y porcentaje de contaminación de la salmuera en la espuma.



IV.- ANÁLISIS ESTADÍSTICO

IV.2.6. Representaciones gráficas de los efectos e interacciones

El análisis factorial fraccionado a dos niveles permite en forma gráfica establecer tres tipos de interacciones entre las variables. De acuerdo a la forma o tendencia de las líneas, existen tres tipos de interacciones de segundo orden:

- Interacción fuerte de segundo orden
- Interacción moderada de segundo orden
- No hay interacción

En la siguiente figura se muestran estos tipos de interacciones entre las variables.

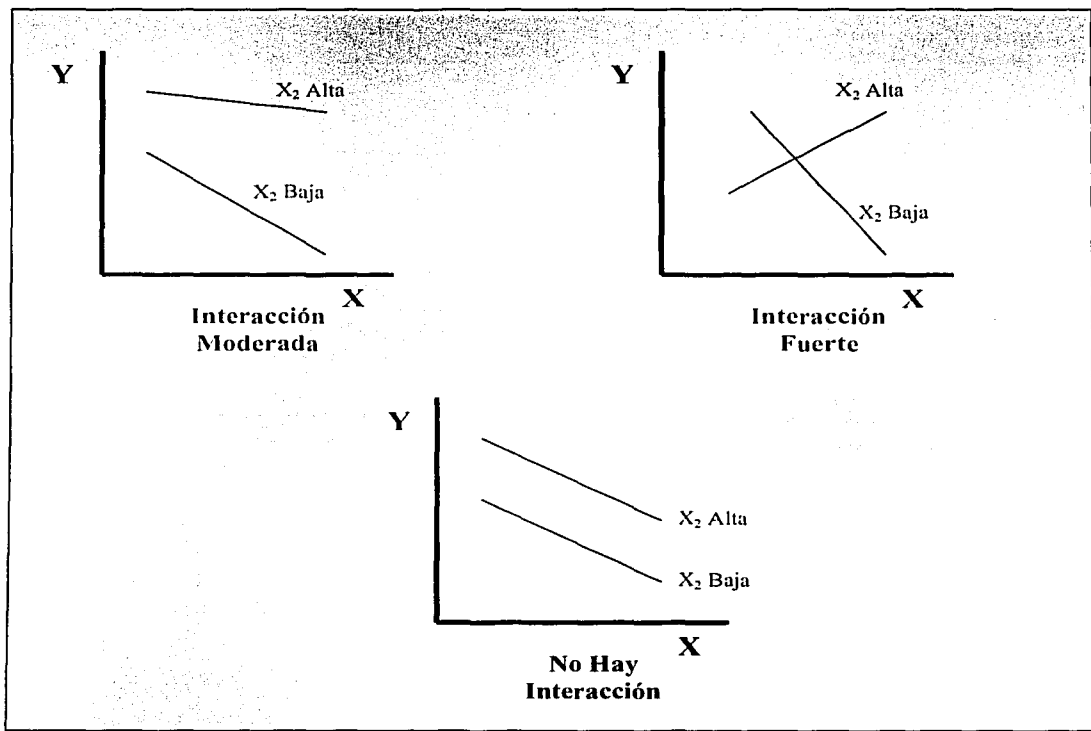


Figura IV.3. Tipos de interacción entre las variables que el análisis estadístico puede descubrir.

IV.- ANÁLISIS ESTADÍSTICO

El objetivo de las figuras (IV.4, IV.5, IV.6), es observar gráficamente el tipo de interacción (débil, medio, fuerte) que existe entre calidad – concentración de (NaCl) en la salmuera, porcentaje de contaminación - concentración de (NaCl) en la salmuera, calidad–porcentaje en volumen de contaminación.

IV.2.6.1. Interacción calidad vs. concentración de (NaCl) en la salmuera

Se trata de comparar la interacción entre los dos niveles seleccionados tanto de la calidad como de la concentración de (NaCl) en la salmuera, a través el valor del promedio de variación del tiempo de vida media de la espuma (porcentaje de control).

Para realizar esta gráfica, se tienen que sacar promedios para cada conjunto o mezcla de niveles. Por ejemplo. Para graficar el punto bajo nivel de calidad-bajo nivel de concentración de (NaCl) se realiza un promedio de entre dos valores, pues, esta prueba se realizó para cada uno de los dos niveles del porcentaje de contaminación. Los demás puntos se obtienen de manera similar. A continuación se muestra una tabla donde se muestran todos los promedios (los datos son tomados de la tabla IV.6).

PUNTO	CALCULO	PROMEDIO DEL PORCENTAJE DE CONTROL
Bajo Nivel calidad Bajo Nivel Concentración (NaCl)	$(14.46 + 71.76) / 2$	43.11
Bajo Nivel Calidad Alto Nivel Concentración (NaCl)	$(20.72 + 90.84) / 2$	55.78
Alto Nivel Calidad Bajo Nivel Concentración (NaCl)	$(16.53 + 78.66) / 2$	47.595
Alto Nivel Calidad Alto Nivel Concentración (NaCl)	$(24.75 + 92.85) / 2$	58.8

Tabla IV.8. Promedios para Calidad – Concentración de (NaCl) en la Salmuera.

La gráfica correspondiente se muestra en la figura (IV.4)

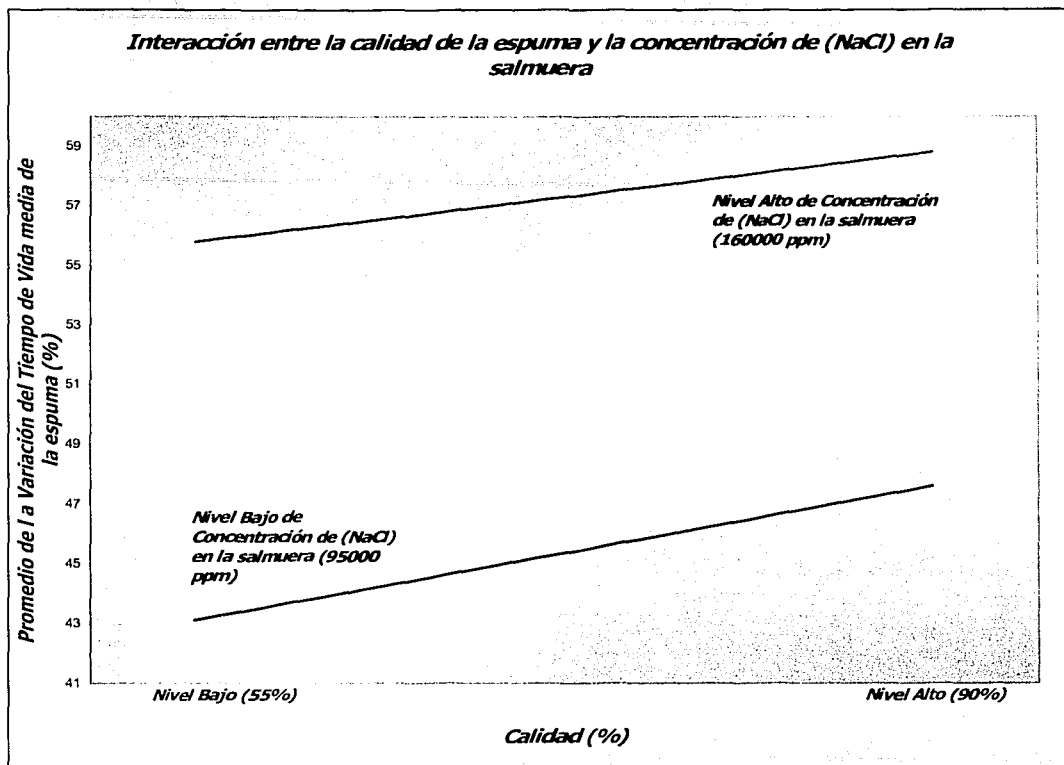


Figura IV.4. Interacción gráfica entre la calidad-concentración de (NaCl) en la salmuera.

De la figura, se observa que la interacción entre la calidad y la concentración de (NaCl) en la salmuera es casi inexistente, (esto se observa gracias al paralelismo entre las dos rectas). Además, se observa, que a una concentración de (NaCl) en la salmuera alta (160000 ppm), se incrementa la variación del tiempo de vida media y este incremento se da de una manera mas grande cuando la espuma tiene altas calidades (90%). También, se observa que a niveles bajos de concentración de (NaCl), el porcentaje de variación del tiempo de vida media de la espuma, tiende a amentar con el aumento en la calidad de la misma. Es decir, la variación del tiempo de vida media de la espuma, tiende a ser mas marcada con la concentración de (NaCl) en la salmuera a calidades de espuma altas.

IV.- ANÁLISIS ESTADÍSTICO

IV.2.6.2. Interacción entre porcentaje en volumen de contaminación vs. concentración de (NaCl) en la salmuera

Los promedios de la variación del tiempo de vida media o porcentaje de control se muestran en la tabla (IV.9), y la gráfica correspondiente para el análisis se muestra en la figura (IV.5):

PUNTO	CALCULO	PROMEDIO
Bajo Nivel (%) de Contaminación Bajo Nivel concentración (NaCl)	$(14.46 + 16.53) / 2$	15.495
Bajo Nivel (%) de Contaminación Alto Nivel concentración (NaCl)	$(20.72 + 24.75) / 2$	22.735
Alto Nivel (%) de Contaminación Bajo Nivel concentración (NaCl)	$(71.76 + 78.66) / 2$	75.21
Alto Nivel (%) de Contaminación Alto Nivel concentración (NaCl)	$(90.84 + 92.85) / 2$	91.845

Tabla IV.9. Promedios para porcentaje de contaminación-concentración de (NaCl) en la salmuera.

En esta gráfica de nuevo se aprecia una interacción muy moderada o leve del segundo tipo entre estas dos variables, es decir, se confirma que tanto la concentración de (NaCl) como el porcentaje de contaminación en la espuma no influyen una a la otra, pero esto no implica que estas variables no influyan sobre la variable dependiente, de hecho, es de resaltar que esta interacción nos muestra que cuando se tiene una concentración de (NaCl) en la salmuera alta, influye mas en la variación del tiempo de vida media de la espuma y que esta influencia aumenta aún mas, cuando se tienen altos niveles de contaminación, esto se observa al tener la línea de alta concentración de (NaCl) por arriba de la baja concentración de (NaCl) y con un porcentaje de variación mayor a un nivel alto de concentración de contaminante en la espuma.

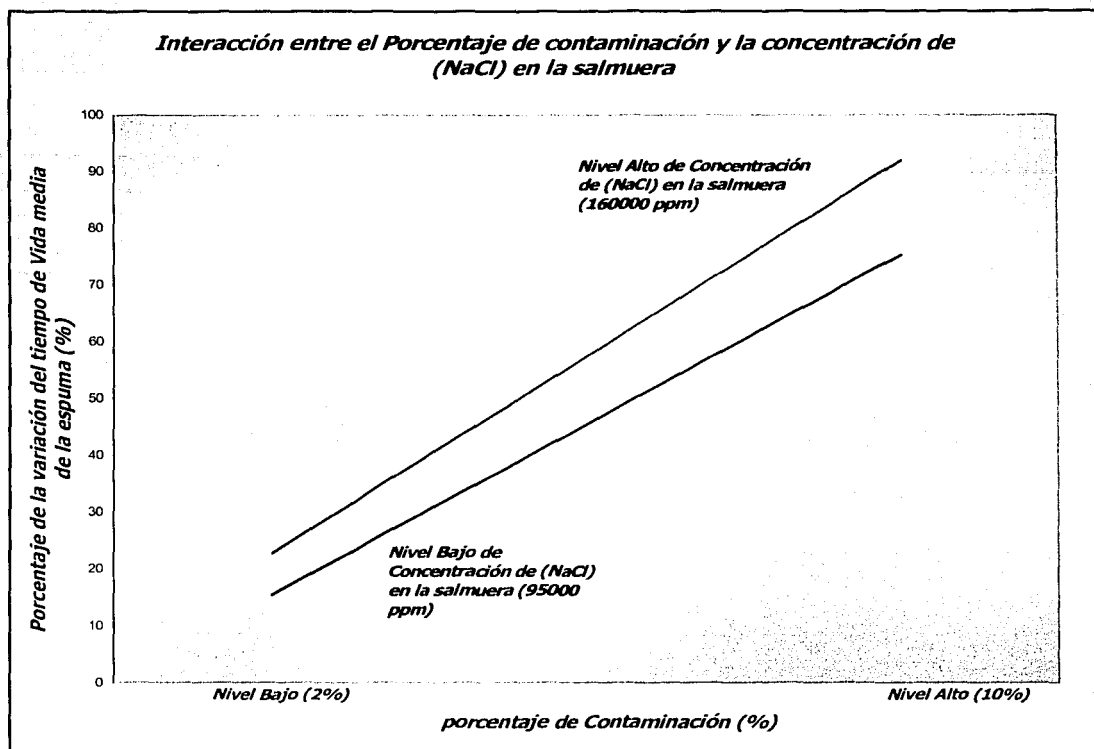


Figura IV.5. Interacción gráfica entre el porcentaje de contaminación y la concentración de (NaCl) en la salmuera.

IV.2.6.3. Interacción entre la calidad vs. porcentaje en volumen de contaminación en la espuma

Los promedios de la variación del tiempo de vida media o porcentaje de control, se muestran en la siguiente tabla (los datos son tomados de la tabla IV.6):

IV.- ANÁLISIS ESTADÍSTICO

PUNTO	CÁLCULO	PROMEDIO
Bajo Nivel Calidad Bajo Nivel (%) de Contaminación	$(14.46 + 20.72) / 2$	17.59
Alto Nivel Calidad Bajo Nivel (%) de Contaminación	$(16.53 + 24.75) / 2$	20.64
Bajo Nivel Calidad Alto Nivel (%) de Contaminación	$(71.76 + 90.84) / 2$	81.3
Alto Nivel Calidad Alto Nivel (%) de Contaminación	$(78.66 + 92.85) / 2$	85.755

Tabla IV.10. Promedios para calidad-porcentaje en volumen de contaminación de la espuma.

La gráfica correspondiente se muestra en la figura (IV.6):

En la anterior gráfica, se observa una interacción muy escasa, inexistente entre la calidad y el porcentaje de contaminación de la salmuera. Esto se observa por la marcada tendencia de mantener un paralelismo entre ambas, Pero, esta vez se presentan mayores incrementos en la variación del tiempo de vida media de la espuma al nivel alto del porcentaje de contaminación con salmuera (se observa por que la línea de porcentaje de contaminación alta, se encuentra por encima de la línea de porcentaje de contaminación baja). Además, se muestra una leve tendencia a aumentar dicha variación en el tiempo de vida media de la espuma conforme la calidad de la misma aumenta (tendencia ascendente de las líneas).

TESIS
FALLA DE

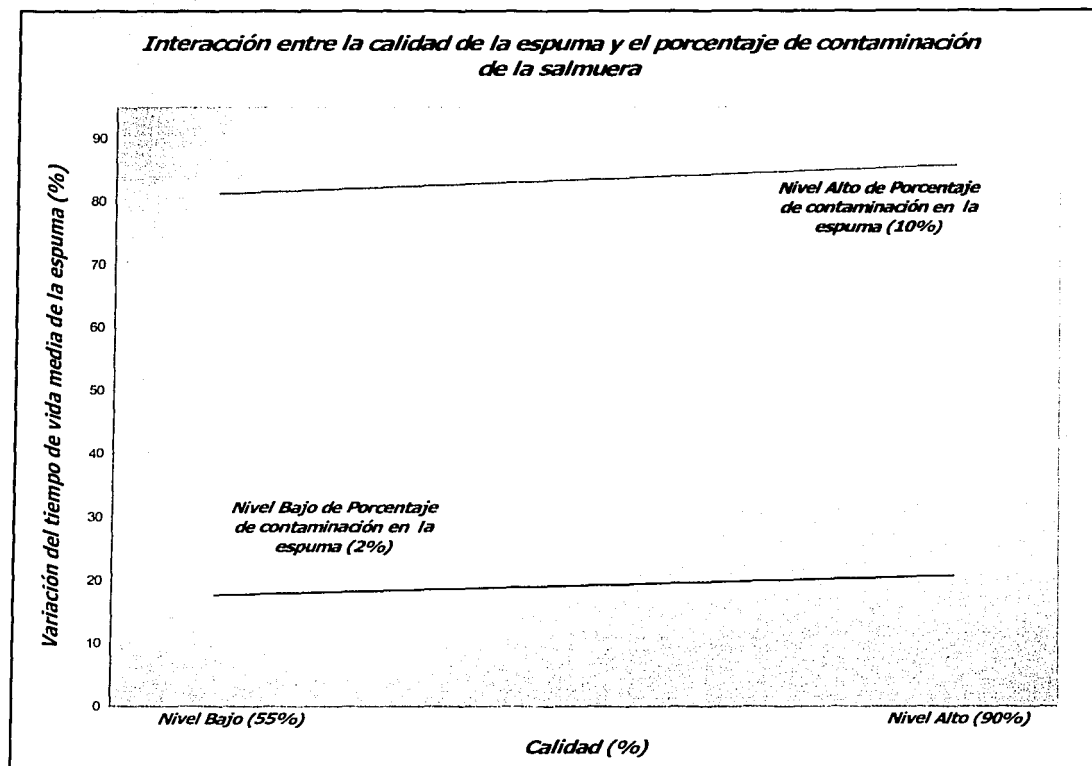


Figura IV.6. Interacción gráfica entre la calidad de la espuma–porcentaje en volumen de contaminación con salmuera con respecto a la variable dependiente.

IV.2.7. Representaciones gráficas de los efectos de los cambios de nivel de las variables independientes.

IV.2.7.1. Efecto debido al cambio de nivel de la variable calidad.

Para cada variable independiente se tienen 4 valores de porcentaje de control por cada nivel. El objetivo de esta sección es analizar los efectos sobre la variable dependiente que tengan los promedios de los cuatro porcentajes de control por nivel. Entonces, se debe construir una tabla en donde se muestre el valor del promedio de la variación del tiempo

IV.- ANÁLISIS ESTADÍSTICO

de vida media de la espuma para el promedio de los cuatro porcentajes de control por nivel (los valores son sacados de la tabla IV.6).

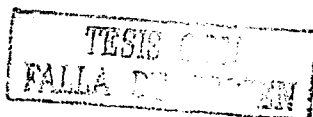
NIVEL	CALCULO	PROMEDIO DEL PORCENTAJE DE CONTROL
Alto	$(16.53 + 24.75 + 78.66 + 92.85) / 4$	53.198
Bajo	$(14.46 + 20.72 + 71.76 + 90.84) / 4$	49.445

Tabla IV.11. Promedio del porcentaje de control para cada nivel de la variable calidad.

La Gráfica de la anterior tabla anterior viene dada por la fig. (VI.7):

De la gráfica anterior, se puede observar, que la calidad presenta un efecto moderado sobre la variación del tiempo de vida media de la espuma, sin embargo, dicha interacción no puede despreciarse en el manejo de resultados. Máxime, cuando la tendencia de vida media de las pruebas completas, han mostrado que hasta una calidad de 80 por ciento, el tiempo de vida media aumenta hasta cuatro puntos porcentuales, mientras que cuando se maneja una calidad de 90 por ciento, dicho aumento se ve disminuido considerablemente.

Tal como se puede apreciar en la gráfica siguiente (fig. VI.8), el porcentaje de variación para una calidad de 80% aumenta. Esto debe ser tenido en cuenta para el análisis posterior.



IV.- ANÁLISIS ESTADÍSTICO

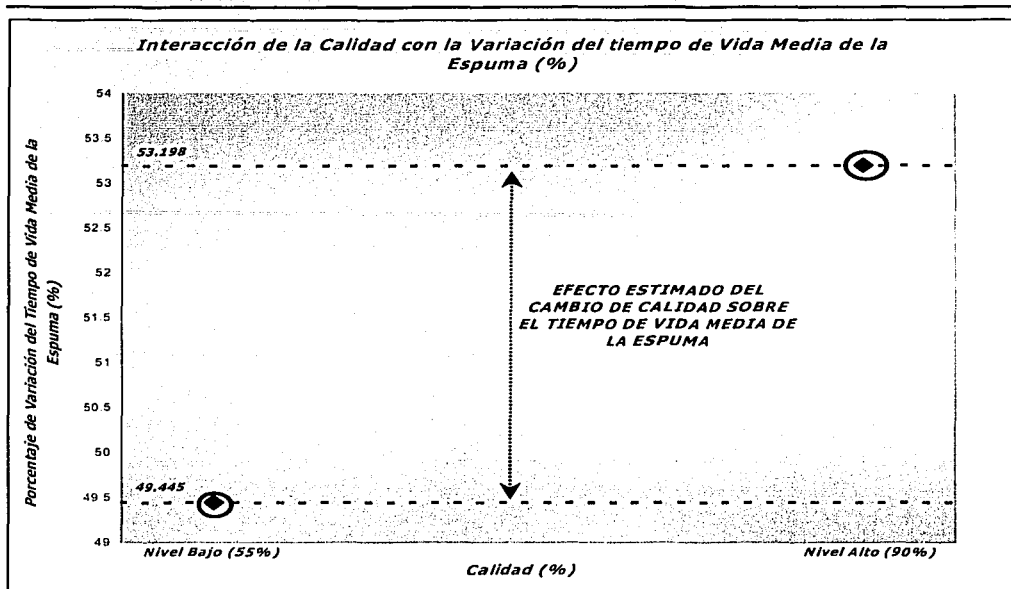


Figura IV.7. Interacción gráfica de la calidad con la variación del porcentaje de variación del Tiempo de Vida Media de la Espuma.

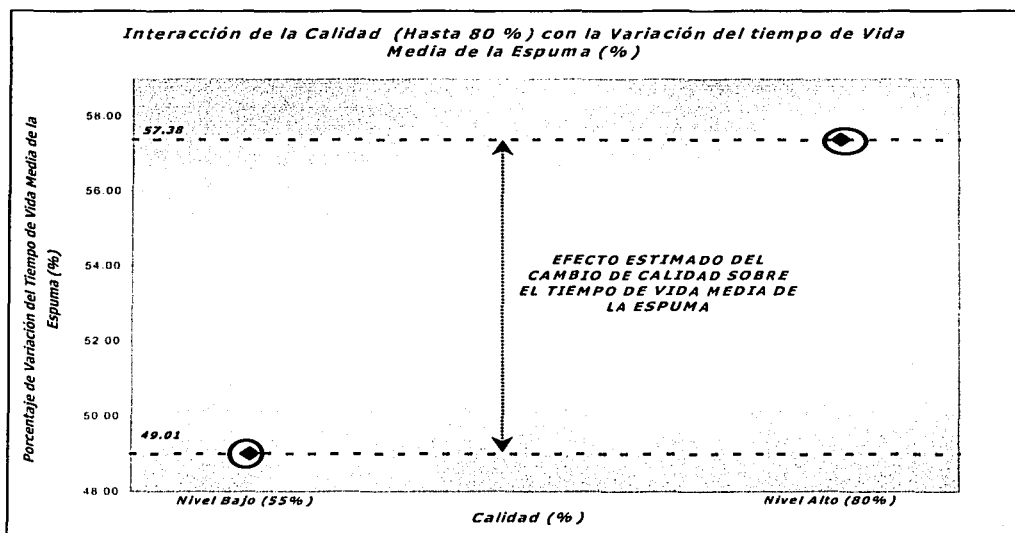


Figura IV.8. Interacción Gráfica de la Calidad hasta (80 %) con la Variación del Porcentaje de Variación del Tiempo de Vida Media de la Espuma.

IV.- ANÁLISIS ESTADÍSTICO

IV.2.7.2. Efecto del cambio de nivel de la variable concentración de (NaCl) en la salmuera.

La siguiente tabla (IV.6) y fig. (IV.9) muestra el valor del promedio de la variación del tiempo de vida media de la espuma para el promedio de los cuatro porcentajes de control por nivel de la variable concentración de (NaCl) en la salmuera, se recuerda que los cuatro valores, son los promedios del porcentaje de control para cada una de las cuatro pruebas de los dos niveles, el nivel alto y el bajo (los datos son tomados de la tabla IV.6).

NIVEL	CALCULO	PROMEDIO DEL PORCENTAJE DE CONTROL
Alto	$(20.72 + 24.75 + 90.84 + 92.85) / 4$	57.29
Bajo	$(14.46 + 16.53 + 71.76 + 78.66) / 4$	45.332

Tabla IV.12. Promedio del porcentaje de control para cada nivel de la variable concentración de (NaCl) en la salmuera.

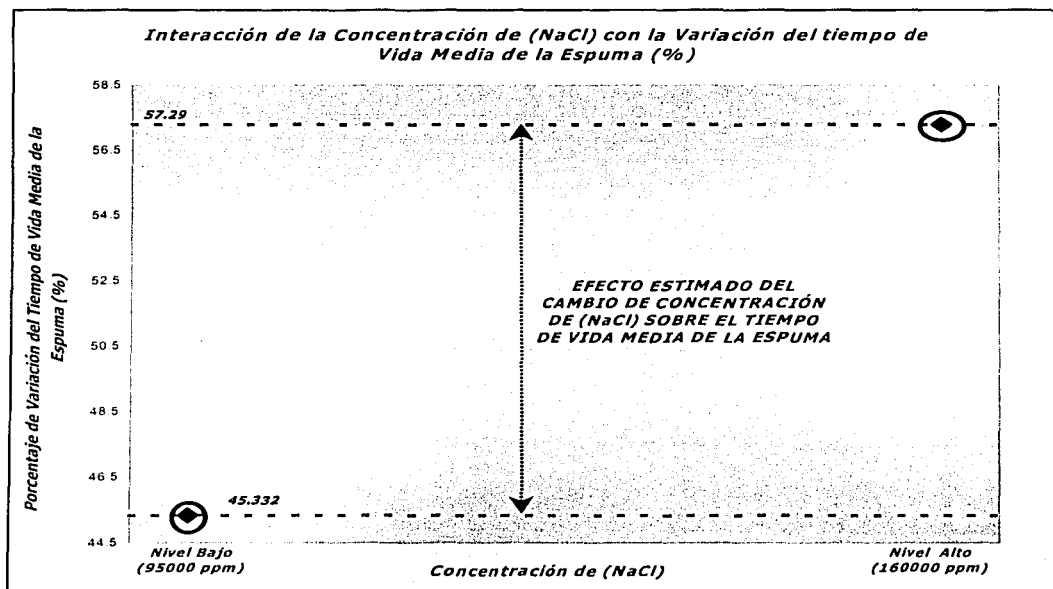


Figura IV.9. Interacción Gráfica de la Concentración de (NaCl) en la Salmuera con la Variación del Porcentaje de Variación del Tiempo de Vida Media de la Espuma.

IV.- ANÁLISIS ESTADÍSTICO

De la figura (IV.9) se puede observar que la concentración de (NaCl) tiene un efecto importante sobre la variable dependiente, de tal forma, que a niveles altos de concentración de (NaCl) se obtienen grandes variaciones en el tiempo de vida media de la espuma.

Esta interacción, debe ser tomada en cuenta en los análisis posteriores, con el objeto de poder simular o modelar acertadamente dicha variación.

IV.2.7.3. Efecto del cambio de nivel de la porcentaje de contaminación de salmuera en la espuma.

La siguiente tabla muestra el valor del promedio de la variación del tiempo de vida media de la espuma para los cuatro porcentajes de control por nivel de la variable porcentaje de Contaminación en la salmuera.

NIVEL	CALCULO	PROMEDIO DEL PORCENTAJE DE CONTROL
Alto	$(71.76 + 78.66 + 90.84 + 92.85) / 4$	83.528
Bajo	$(14.46 + 16.53 + 20.72 + 24.75) / 4$	19.115

Tabla IV.13. Promedio del porcentaje de control para cada nivel de la variable porcentaje en volumen de contaminación con salmuera.

En esta gráfica (IV.10), se puede observar la gran influencia que sobre la variación del tiempo de vida media tiene la variable porcentaje de contaminación con salmuera en la espuma (de 83.5 % aproximadamente en su nivel alto de contaminación (10%)), lo cual, es el factor preponderante para el cambio en la variable dependiente de estas pruebas experimentales, es decir, el tiempo de vida media de la espuma.

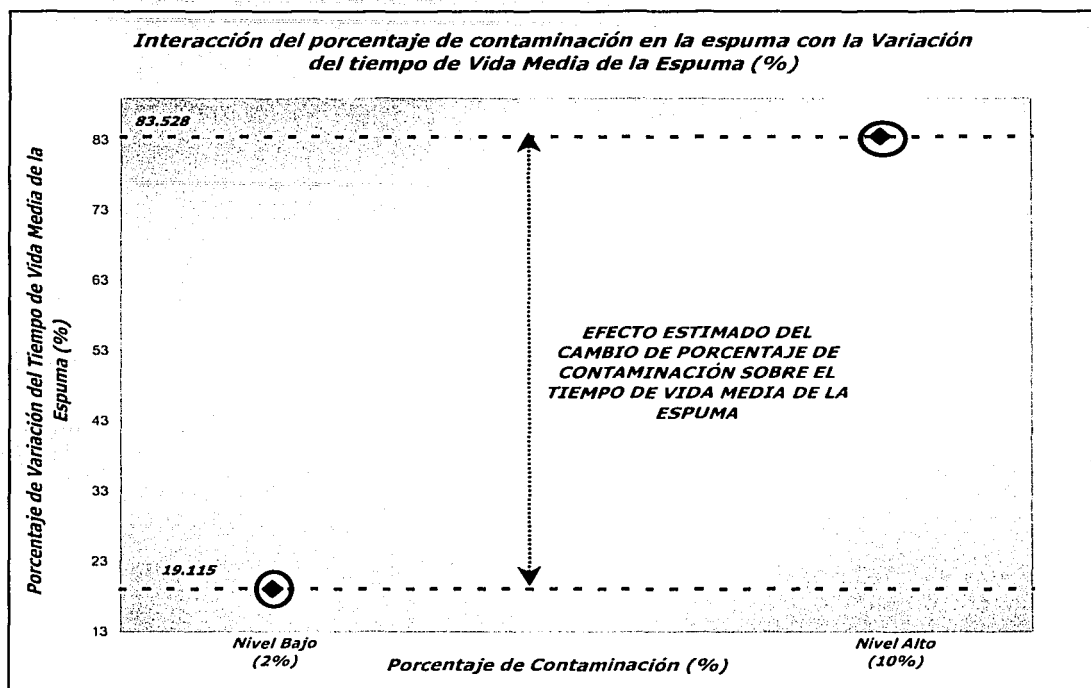


Figura IV.10. Interacción Gráfica del Porcentaje en Volumen de Contaminación con Salmuera con la Variación del Porcentaje de Variación del Tiempo de Vida Media de la Espuma.

IV.2.7.3. Efecto del cambio de nivel de las tres variables independientes.

La siguiente tabla muestra el valor del promedio de la variación del tiempo de vida media de la espuma para los cuatro porcentajes de control por nivel de la interacción de las tres variables independientes.

NIVEL	CALCULO	PROMEDIO DEL PORCENTAJE DE CONTROL
Alto	$(16.53 + 20.72 + 71.76 + 92.85) / 4$	50.465
Bajo	$(14.46 + 24.75 + 78.66 + 90.84) / 4$	52.178

Tabla IV.14. Promedio del porcentaje de control para cada nivel de la conjunción de las tres variables independientes.

IV.- ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Gráficamente se expresa como:

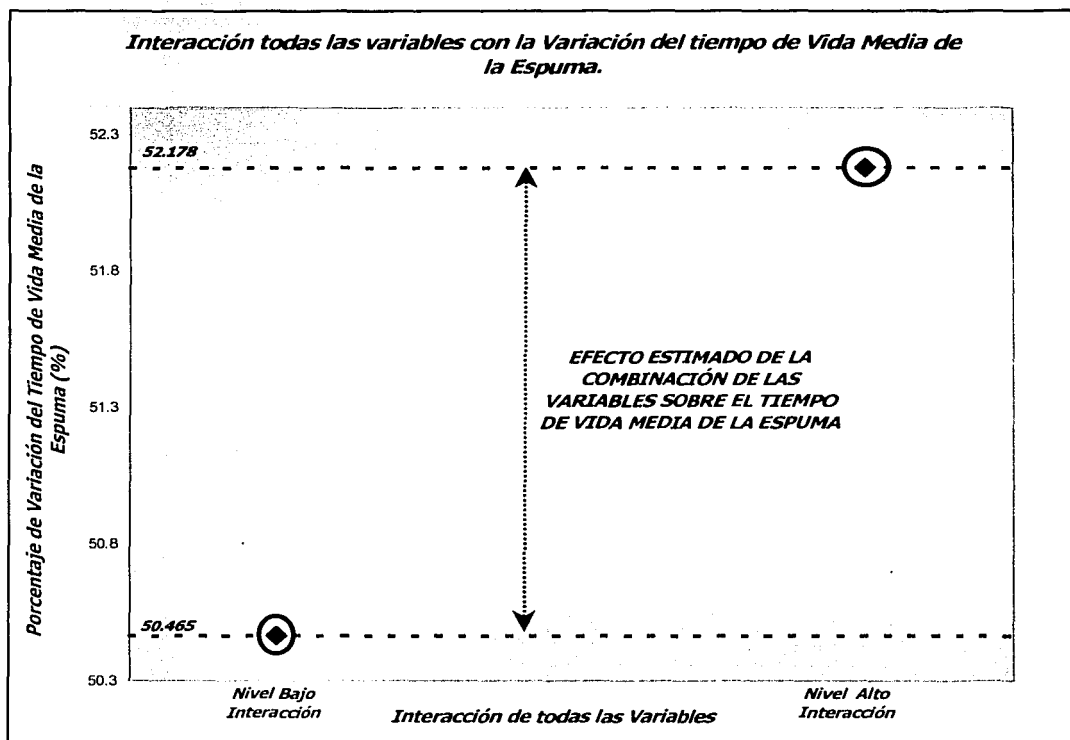


Figura IV.11. Interacción gráfica de la conjunción de las tres variables independientes con la variación del porcentaje de variación del tiempo de vida media de la espuma.

En esta gráfica. La interacción de las tres variables, parece tener una influencia moderada sobre la variación del tiempo de vida media de la espuma, esto es de esperarse, conforme se han visto las interacciones entre las variables por separado, donde se han observado, que entre ellas, no existe una interacción muy grande.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

CAPÍTULO V.

ANÁLISIS DE DATOS.

V. - ANÁLISIS DE DATOS.

En el presente capítulo, se tratarán los resultados obtenidos en las pruebas desarrolladas en el laboratorio de fluidos de perforación de la facultad de ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), según la metodología del capítulo II.

Como se pudo observar en el capítulo anterior, existen varias interacciones de las variables independientes sobre la variable dependiente, lo que pretende este capítulo es poder encontrar matemáticamente dichas relaciones.

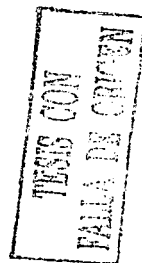
V.1. PROCEDIMIENTO.

V.1.1. Instrumentos:

Para la medición de tiempo de vida media de la espuma, se utilizaron los siguientes instrumentos disponibles en el laboratorio:

CANTIDAD	MATERIAL
1	Balanza electrónica.
1	Vaso de 100 ml.
1	Mortero de porcelana.
3	Vasos de metal graduados a 800 ml.
2	Vasos de Metal de 2000 ml.
1	Espátula.
3	Dispersores de velocidad variable.
1	Probeta graduada de 1000 ml.
1	Probeta graduada de 500 ml.
11	Probetas graduadas de 100 ml.
10	Probetas graduadas de 50 ml.
3	Probetas graduadas de 25 ml.
7	Probetas graduadas de 10 ml.
1	Cronómetro.

Tabla V.1. Materiales utilizados en las pruebas de tiempo de vida media de la espuma.



V.- ANÁLISIS DE DATOS

V.1.2. Procedimientos:

Para asegurar que las muestras tuviesen un idéntico tratamiento en su preparación y medición y que estas no fuesen una fuente de error en las mediciones, se desarrolló un a metodología precisa para su manejo. A continuación, se presenta dicha metodología:

1.- Composición de la espuma:

Material	Cantidad
Agua	100 % en volumen.
Bentonita	3% en Peso.
Polímero Viscosificante	1% en peso.
Sosa cáustica	0.1% en Peso.
Espumante	1.5% en Volumen.

Tabla V.2. Composición de la espuma.

Teniendo en cuenta las concentraciones respectivas para las diferentes calidades y para preparar la base líquida:

2.- Preparación de la base líquida:

Tomando como base dos litros de agua para la preparación:

- 2.1 Verter dos litros de agua en la jarra de dos litros y agitar a 3000 rpm (la graduación de los dispersores, es en porcentaje de salida de voltaje, el cual, en sus 100% tenía 115 voltios que equivalen a 10000 rpm, por lo que se agitó al 30% de salida de voltaje).
- 2.2 Agregar lentamente (60) gramos de Bentonita al agua que se encuentra en agitación y asegurarse que quede debidamente dispersa en el agua.

V.- ANÁLISIS DE DATOS

2.3 Agregar lentamente (20) gramos de polímero viscosificante a la mezcla de bentonita y agua, sin dejar de agitar, asegurarse que esta nueva mezcla, se disperse completamente.

2.4 Agregar lentamente dos gramos de sosa cáustica, y agitar hasta asegurarse que la mezcla se encuentra uniformemente dispersa.

2.5 Tener la base líquida de la espuma en constante agitación durante las pruebas.

3.- Preparación de la espuma:

3.1 Teniendo en cuenta los volúmenes necesarios para espumar a 800 ml las diferentes calidades, separar el volumen de base líquida necesario para el mismo. A continuación, se especifican las cantidades necesarias para 800 ml de espuma y las diferentes calidades.

Tomando en cuenta 800 ml de Espuma		
<i>Calidad (porcentaje)</i>	<i>Volumen de base líquida (ml)</i>	<i>Volumen de espumante (ml)</i>
55	360	5.4
60	320	4.8
70	240	3.6
80	160	2.4
90	80	1.2

Tabla V.3. Volúmenes de base líquida y espumante para las diferentes calidades.

3.2 Con el volumen de base líquida separado en el vaso de metal de 800 ml, agregar la respectiva cantidad de espumante para cada calidad.

3.3 Agitar la mezcla durante 15 minutos a una velocidad variable entre 2500 y 4000 rpm. (a este tiempo ya debió alcanzar el volumen de 800 ml y debe mantenerse a este). (si no ha alcanzado el volumen o lo ha sobrepasado, repetir la mezcla).

V.- ANÁLISIS DE DATOS

3.4 Alcanzados los 15 minutos de agitación, retirar la muestra del dispersor y prepararse para toma de datos.

4.- Preparación de la salmuera:

Tomando en cuenta la preparación de un litro de salmuera, se tiene:

4.1 Medir y agregar a un vaso de metal de dos litros, un litro de agua.

4.2 Agitar el agua en un dispersor a 3000 rpm.

4.3 En la balanza electrónica, previamente nivelada, medir la cantidad de sal (NaCl) necesaria para alcanzar una salmuera de las condiciones especificadas y agregarla lentamente al agua en el dispersor. A continuación se hace una relación de la cantidad de sal necesaria para las diferentes salmueras.

Concentración de sal (ppm)	Cantidad de sal necesaria (mg/L)
95000	101100
130000	142000
160000	178600

Tabla V.4. Cantidades de sal para preparar las diferentes concentraciones de salmueras.

4.4 Mantener en constante agitación la salmuera durante las pruebas.

5.- Recolección de datos:

5.1 Alistar diez (10) probetas graduadas cada ml hasta 100 ml, colocando frente a cada una etiquetas que registren el porcentaje de salmuera que van a contener, con los respectivos volúmenes de llenado, tanto de salmuera como de espuma, en otra etiqueta, especificar el volumen al que se debe romper la espuma, colocar otra etiqueta que contenga espacio para apuntar el tiempo de inicio de la prueba y el tiempo en que se rompa.

V.- ANÁLISIS DE DATOS

- 5.2** Atrás de las probetas de 100 ml colocar las probetas de 10 ml y de 25 ml que contienen el volumen de salmuera necesario para realizar las diferentes pruebas.
- 5.3** Al momento de salir la muestra de espuma, se empieza a verter la misma dentro de las probetas, llenando el respectivo volumen de espuma y agregando el de salmuera, agitándose durante cinco segundos aproximadamente, registrándose el tiempo inicial de comienzo de cada muestra. Se empieza el llenado progresivamente y de forma ascendente, es decir, se empieza desde la muestra limpia, hasta la muestra de 35% en volumen de salmuera.

A continuación se especifica el porcentaje de contaminación con salmuera y su respectivo volumen:

<i>Porcentaje de contaminación (%)</i>	<i>Volumen de Espuma (ml)</i>	<i>Volumen sal (ml)</i>	<i>Volumen total (ml)</i>
0	100	0	100
2	98	2	100
4	96	4	100
6	94	6	100
8	92	8	100
10	90	10	100
15	85	15	50
20	40	10	50
25	37.5	12.5	50
30	35	15	50

Tabla V.5. Porcentaje de contaminación con salmuera y volumen respectivo.

- 5.4** Después de depositar las muestras en sus respectivos recipientes y registrar su tiempo inicial, monitorear constantemente su progreso hasta que alcancen el volumen estipulado para su rompimiento. Registrar dicho tiempo y anotarlo también en la bitácora de experimentación.

V.- ANÁLISIS DE DATOS

6.- Pruebas con aceite diesel:

- 6.1 Realizar el procedimiento de recolección de datos, pero utilizando como contaminante el aceite Diesel.

7.- Procedimiento de limpieza:

- 7.1. Al comenzar cada prueba y al finalizarla, se debe lavar vigorosamente los instrumentos utilizados, empleando para ello, agua común del acueducto y jabón en polvo para el mismo.
- 7.2. Se deben dejar secando los aparatos utilizados así como limpias y secas las aspas de los agitadores en uso.
- 7.3. Guardar todos los materiales en sus respectivas gavetas y dejar el laboratorio en completo orden.

8.- Procedimiento de seguridad:

- 8.1. Evitar el contacto directo con la sosa cáustica, y en caso de contacto lavar inmediata y vigorosamente la zona afectada por el mismo.
- 8.2. Evitar emplear frascos de vidrio para la agitación de la base líquida y para la agitación de la espuma, ya que estos podrían romperse al contacto con las aspas.
- 8.3. Portar en todo momento las batas de laboratorio para evitar untar las vestimentas con algún tipo de químico peligroso.
- 8.4. Seguir los procedimientos convencionales de seguridad dispuestos en el laboratorio para diferentes problemas.

V.- ANÁLISIS DE DATOS

V.2. RESULTADOS.

A continuación, se muestran los datos tabulados de las diferentes pruebas realizadas para las diferentes calidades y las diferentes concentraciones de salmuera, con sus respectivas concentraciones en volumen de cada una, los datos mostrados, son los promedios de tres pruebas tomadas para cada una de las muestras.

1.- Concentración de salmuera de 95000 ppm para diferentes calidades (promedios).

Tabla V.6. Calidad de 55% con salmuera de 95000 ppm

Calidad	55%	V _{líquido*}	360	ml		
Vespuma:	800 ml	Vespumante:	5.4	ml		
% espuma	% Sal	V espuma	V Sal	V rompe	Vida media	
% Vol.	% Vol.	ml	ml	ml	horas	seg.
100	0	100	0	22.50	1:12:52	4372
98	2	98	2	22.05	1:00:25	3625
96	4	96	4	21.60	0:49:58	2998
94	6	94	6	21.15	0:37:17	2237
92	8	92	8	20.70	0:27:53	1673
90	10	90	10	20.25	0:19:57	1197
85	15	42.5	7.5	9.56	0:04:38	278
80	20	40	10	9.00	0:00:36	36
75	25	37.5	12.5	8.44	0:00:33	33
70	30	35	15	7.88	0:00:23	23

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

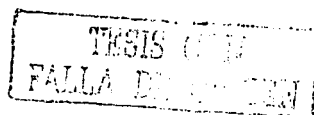
V.- ANÁLISIS DE DATOS

Tabla V.7. Calidad de 60% con salmuera de 95000 ppm

Calidad	60%	V_{liquido}	320	ml		
Vespuma	800 ml	Vespumante	4.8	ml		
% espuma	% Sal	Vespuma	V Sal	V rompe	Vida media	
% Vol.	% Vol.	ml	ml	ml	horas	seg.
100	0	100	0	20.00	1:28:30	5310
98	2	98	2	19.60	1:15:44	4544
96	4	96	4	19.20	1:02:04	3724
94	6	94	6	18.80	0:47:53	2873
92	8	92	8	18.40	0:34:43	2083
90	10	90	10	18.00	0:20:36	1236
85	15	42.5	7.5	8.50	0:04:59	299
80	20	40	10	8.00	0:00:35	35
75	25	37.5	12.5	7.50	0:00:34	34
70	30	35	15	7.00	0:00:16	16

Tabla V.8. Calidad de 70% con salmuera de 95000 ppm

Calidad	70%	V_{liquido}	240	ml		
Vespuma	800 ml	Vespumante	3.6	ml		
% espuma	% Sal	Vespuma	V Sal	V rompe	Vida media	
% Vol.	% Vol.	ml	ml	ml	horas	seg.
100	0	100	0	15.00	1:47:32	6442
98	2	98	2	14.70	1:30:57	5457
96	4	96	4	14.40	1:14:14	4454
94	6	94	6	14.10	0:53:35	3215
92	8	92	8	13.80	0:37:57	2277
90	10	90	10	13.50	0:20:03	1203
85	15	42.5	7.5	6.38	0:05:58	358
80	20	40	10	6.00	0:01:30	90
75	25	37.5	12.5	5.63	0:00:56	56
70	30	35	15	5.25	0:00:20	20



V.- ANÁLISIS DE DATOS

Tabla V.9. Calidad de 80% con salmuera de 95000 ppm

Calidad	80%	V_{líquido}: 160 ml				
V_{espuma}: 800 ml		V_{espumante}: 2.4 ml				
% espuma	% Sal	V_{espuma}	V_{Sal}	V_{rompe}	Vida media	
% Vol.	% Vol.	ml	ml	ml	horas	seg.
100	0	100	0	10.00	2:05:20	7520
98	2	98	2	9.80	1:47:19	6439
96	4	96	4	9.60	1:28:48	5328
94	6	94	6	9.40	1:07:23	4043
92	8	92	8	9.20	0:43:32	2612
90	10	90	10	9.00	0:20:24	1224
85	15	42.5	7.5	4.25	0:02:19	139
80	20	40	10	4.00	0:01:03	63
75	25	37.5	12.5	3.75	0:00:41	41
70	30	35	15	3.50	0:00:19	19

Tabla V.10. Calidad de 90% con salmuera de 95000 ppm

Calidad	90%	V_{líquido}: 80 ml				
V_{espuma}: 800 ml		V_{espumante}: 1.2 ml				
% espuma	% Sal	V_{espuma}	V_{Sal}	V_{rompe}	Vida media	
% Vol.	% Vol.	ml	ml	ml	horas	seg.
100	0	100	0	5.00	1:27:53	5273
98	2	98	2	4.90	1:13:09	4389
96	4	96	4	4.80	1:01:49	3709
94	6	94	6	4.70	0:42:59	2579
92	8	92	8	4.60	0:30:21	1821
90	10	90	10	4.50	0:18:42	1122
85	15	85	15	4.25	0:01:07	67
80	20	40	10	2.00	0:00:31	31
75	25	37.5	12.5	1.88	0:00:18	18
70	30	35	15	1.75	0:00:10	10

V.- ANÁLISIS DE DATOS

2.- Concentración de salmuera de 130000 ppm para diferentes calidades (promedios).

Tabla V.11. Calidad de 55% con salmuera de 130000 ppm

Calidad	55%	V_{liquido}:	360	ml		
V_{espuma}:	800 ml	V_{espumante}:	5.4	ml		
% espuma	% Sal	V_{espuma}	V Sal	V rompe	Vida media	
% Vol.	% Vol.	ml	ml	ml	horas	seg.
100	0	50	0	11.25	1:09:34	4174
98	2	49	1	11.03	0:56:56	3416
96	4	48	2	10.80	0:43:47	2627
94	6	47	3	10.58	0:33:07	1987
92	8	46	4	10.35	0:22:03	1323
90	10	45	5	10.13	0:11:54	714
85	15	42.5	7.5	9.56	0:02:05	125
80	20	40	10	9.00	0:01:06	66
75	25	37.5	12.5	8.44	0:00:35	35
70	30	35	15	7.88	0:00:02	2

Tabla V.12. Calidad de 60% con salmuera de 130000 ppm

Calidad	60%	V_{liquido}:	320	ml		
V_{espuma}:	800 ml	V_{espumante}:	4.8	ml		
% espuma	% Sal	V_{espuma}	V Sal	V rompe	Vida media	
% Vol.	% Vol.	ml	ml	ml	horas	seg.
100	0	50	0	10.00	1:27:52	5272
98	2	49	1	9.80	1:11:52	4312
96	4	48	2	9.60	0:55:41	3341
94	6	47	3	9.40	0:43:20	2600
92	8	46	4	9.20	0:29:59	1799
90	10	45	5	9.00	0:13:00	780
85	15	42.5	7.5	8.50	0:02:20	140
80	20	40	10	8.00	0:00:44	44
75	25	37.5	12.5	7.50	0:00:07	7
70	30	35	15	7.00	0:00:03	3

V.- ANÁLISIS DE DATOS

Tabla V.13. Calidad de 70% con salmuera de 130000 ppm

Calidad	70%	V_{líquido}:	240	ml		
V_{espuma}:	800 ml	V_{espumante}:	3.6	ml		
% espuma	% Sal	V_{espuma}	V_{Sal}	V_{rompe}	Vida media	
% Vol.	% Vol.	ml	ml	ml	horas	seg.
100	0	50	0	7.50	1:46:36	6396
98	2	49	1	7.35	1:28:10	5290
96	4	48	2	7.20	1:08:15	4095
94	6	47	3	7.05	0:48:47	2927
92	8	46	4	6.90	0:32:23	1943
90	10	45	5	6.75	0:12:37	757
85	15	42.5	7.5	6.38	0:03:17	197
80	20	40	10	6.00	0:01:02	62
75	25	37.5	12.5	5.63	0:00:44	44
70	30	35	15	5.25	0:00:12	12

Tabla V.14. Calidad de 80% con salmuera de 130000 ppm

Calidad	80%	V_{líquido}:	160	ml		
V_{espuma}:	800 ml	V_{espumante}:	2.4	ml		
% espuma	% Sal	V_{espuma}	V_{Sal}	V_{rompe}	Vida media	
% Vol.	% Vol.	ml	ml	ml	horas	seg.
100	0	50	0	5.00	2:05:04	7504
98	2	98	2	9.80	1:44:55	6295
96	4	96	4	9.60	1:17:56	4676
94	6	94	6	9.40	0:56:21	3381
92	8	92	8	9.20	0:34:10	2050
90	10	45	5	4.50	0:12:53	773
85	15	42.5	7.5	4.25	0:02:43	163
80	20	40	10	4.00	0:00:41	41
75	25	37.5	12.5	3.75	0:00:15	15
70	30	35	15	3.50	0:00:02	2

V.- ANÁLISIS DE DATOS

Tabla V.15. Calidad de 90% con salmuera de 130000 ppm

Calidad	90%	V_{liquido*}	80	ml		
Vespuma*	800 ml	Vespumante*	1.2	ml		
% espuma	% Sal	V espuma	V Sal	V rompe	Vida media	
% Vol.	% Vol.	ml	ml	ml	horas	seg.
100	0	100	0	5.00	1:27:52	5272
98	2	98	2	4.90	1:10:20	4220
96	4	96	4	4.80	0:55:42	3342
94	6	94	6	4.70	0:38:23	2303
92	8	92	8	4.60	0:24:15	1455
90	10	90	10	4.50	0:12:02	722
85	15	42.5	7.5	2.13	0:00:42	42
80	20	40	10	2.00	0:00:18	18
75	25	37.5	12.5	1.88	0:00:11	11
70	30	35	15	1.75	0:00:01	1

3.- Concentración de salmuera de 160000 ppm para diferentes calidades (promedios).

Tabla V.16. Calidad de 55% con salmuera de 160000 ppm

Calidad	55%	V_{liquido*}	360	ml		
Vespuma*	800 ml	Vespumante*	5.4	ml		
% espuma	% Sal	V espuma	V Sal	V rompe	Vida media	
% Vol.	% Vol.	ml	ml	ml	horas	seg.
100	0	100	0	22.50	1:09:28	4168
98	2	98	2	22.05	0:56:00	3360
96	4	96	4	21.60	0:41:12	2472
94	6	94	6	21.15	0:30:15	1815
92	8	92	8	20.70	0:18:57	1137
90	10	90	10	20.25	0:06:28	388
85	15	42.5	7.5	9.56	0:04:14	254
80	20	40	10	9.00	0:01:15	75
75	25	37.5	12.5	8.44	0:00:38	38
70	30	35	15	7.88	0:00:04	4

V.- ANÁLISIS DE DATOS

Tabla V.17. Calidad de 60% con salmuera de 160000 ppm

Calidad	60%	V_{líquido}:	320	ml		
V_{espuma}:	800 ml	V_{espumante}:	4.8	ml		
% espuma	% Sal	V_{espuma}	V_{Sal}	V_{rompe}	Vida media	
% Vol.	% Vol.	ml	ml	ml	horas	seg.
100	0	100	0	20.00	1:27:09	5229
98	2	98	2	19.60	1:11:14	4274
96	4	96	4	19.20	0:51:41	3101
94	6	94	6	18.80	0:36:28	2188
92	8	92	8	18.40	0:21:52	1312
90	10	90	10	18.00	0:06:29	389
85	15	42.5	7.5	8.50	0:03:12	192
80	20	40	10	8.00	0:00:24	24
75	25	37.5	12.5	7.50	0:00:23	23
70	30	35	15	7.00	0:00:12	12

Tabla V.18. Calidad de 70% con salmuera de 160000 ppm

Calidad	70%	V_{líquido}:	240	ml		
V_{espuma}:	800 ml	V_{espumante}:	3.6	ml		
% espuma	% Sal	V_{espuma}	V_{Sal}	V_{rompe}	Vida media	
% Vol.	% Vol.	ml	ml	ml	horas	seg.
100	0	100	0	15.00	1:45:53	6353
98	2	98	2	14.70	1:23:20	5000
96	4	96	4	14.40	1:00:38	3638
94	6	94	6	14.10	0:43:59	2639
92	8	92	8	13.80	0:25:42	1542
90	10	90	10	13.50	0:06:31	391
85	15	42.5	7.5	6.38	0:01:27	87
80	20	40	10	6.00	0:00:23	23
75	25	37.5	12.5	5.63	0:00:19	19
70	30	35	15	5.25	0:00:12	12

V.- ANÁLISIS DE DATOS

Tabla V.19. Calidad de 80% con salmuera de 160000 ppm

Calidad	80%	V_{liquido}	160	ml		
Vespuma	800 ml	Vespumante	2.4	ml		
% espuma	% Sal	Vespuma	VSal	V rompe	Vida media	
% Vol.	% Vol.	ml	ml	ml	horas	seg.
100	0	100	0	10.00	2:05:18	7518
98	2	98	2	9.80	1:39:59	5999
96	4	96	4	9.60	1:16:12	4572
94	6	94	6	9.40	0:51:30	3090
92	8	92	8	9.20	0:30:37	1837
90	10	90	10	9.00	0:06:46	406
85	15	42.5	7.5	4.25	0:01:19	79
80	20	40	10	4.00	0:00:22	22
75	25	37.5	12.5	3.75	0:00:08	8
70	30	35	15	3.50	0:00:02	2

Tabla V.20. Calidad de 90% con salmuera de 160000 ppm

Calidad	90%	V_{liquido}	80 ml			
Vespuma	800 ml	Vespumante	1.2 ml			
% espuma	% Sal	Vespuma	VSal	V rompe	Vida media	
% Vol.	% Vol.	ml	ml	ml	horas	seg.
100	0	100	0	5.00	1:27:10	5230
98	2	98	2	4.90	1:05:57	3957
96	4	96	4	4.80	0:50:24	3024
94	6	94	6	4.70	0:39:14	2354
92	8	92	8	4.60	0:20:54	1254
90	10	90	10	4.50	0:06:16	376
85	15	85	15	4.25	0:20:33	33
80	20	40	10	2.00	0:00:10	10
75	25	37.5	12.5	1.88	0:00:08	8
70	30	35	15	1.75	0:00:03	3

V.- ANÁLISIS DE DATOS

V.2.1. Manejo de resultados:

Con los datos anteriores, se realizaron diferentes gráficas, con las que se buscó determinar las diferentes influencias sobre el tiempo de vida media de la espuma, factor que influye directamente en la estabilidad de la espuma.

Con este propósito, se desarrollaron las siguientes gráficas:

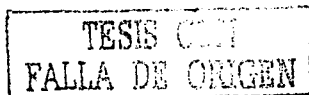
- 1.- Tiempo de vida media a diferentes calidades vs. Porcentaje en volumen de sal a una concentración de salmuera específica.
- 2.- Tiempo de vida media a una calidad específica vs. Porcentaje en volumen de sal a diferentes concentraciones de salmuera.
- 3.- Porcentaje en volumen de sal vs. El porcentaje de variación del tiempo a las diferentes calidades.

Con el primer tipo de gráfica, se obtuvo tres gráficas, las correspondientes a (95000, 13000, 160000 ppm) de concentración de sal.

Con las segundas gráficas se obtuvo un juego de cinco gráficas para las diferentes calidades tratadas (55, 60, 70, 80, 90 por ciento).

Con el tercer tipo de gráficas se obtuvo también un juego de cinco gráficas para las diferentes calidades tratadas (55, 60, 70, 80, 90 por ciento).

En todas estas gráficas, inicialmente se consideraron todos los juegos de datos obtenidos, pero, por razones que se tratarán en la siguiente sección de análisis de datos, para los análisis, se consideraron los datos obtenidos hasta el 10 por ciento en volumen de mezcla de la sal.



V.2.2. Análisis de resultados:

Inicialmente, se elaboraron los juegos de gráficas determinadas anteriormente, con las cuales se busca establecer una relación entre los parámetros que se variaron en las pruebas, los cuales, son: la calidad, el porcentaje en volumen de contaminación de la salmuera y la concentración en ppm (partes por millón) de la salmuera.

1.- Variación del porcentaje de volumen de sal en la espuma:

este análisis se abordará por considerar como un factor preponderante, el determinar que porcentaje de sal en la espuma nos provee un dato característico del comportamiento de la estabilidad de la espuma en estudio.

Nota:

Los datos fuente de las siguientes gráficas, y las gráficas ampliadas, son mostrados en el (anexo B).

Para una calidad de 55%, la gráfica obtenida es la siguiente:

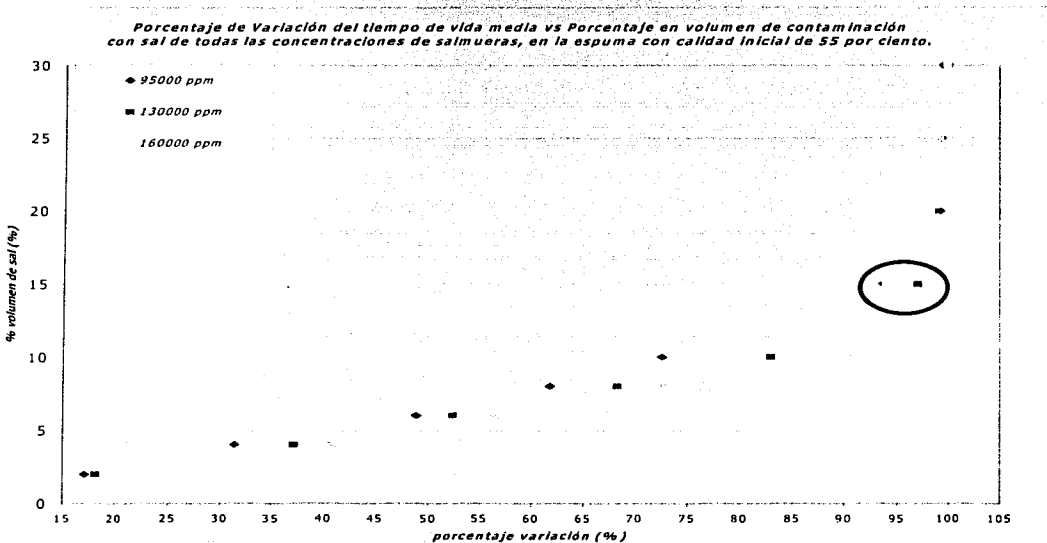


Fig. V.1. Porcentaje de variación del tiempo de vida media vs. Porcentaje en volumen de contaminación con sal de todas las concentraciones de salmueras, en la espuma con calidad inicial de 55 por ciento.

V.- ANÁLISIS DE DATOS

En esta gráfica se observa que a una contaminación del 15% en volumen de salmuera, en la muestra ya se tiene una variación mayor de 95%; lo que indica una reducción drástica en el tiempo de vida media.

Luego, para la calidad de 60% la gráfica es:

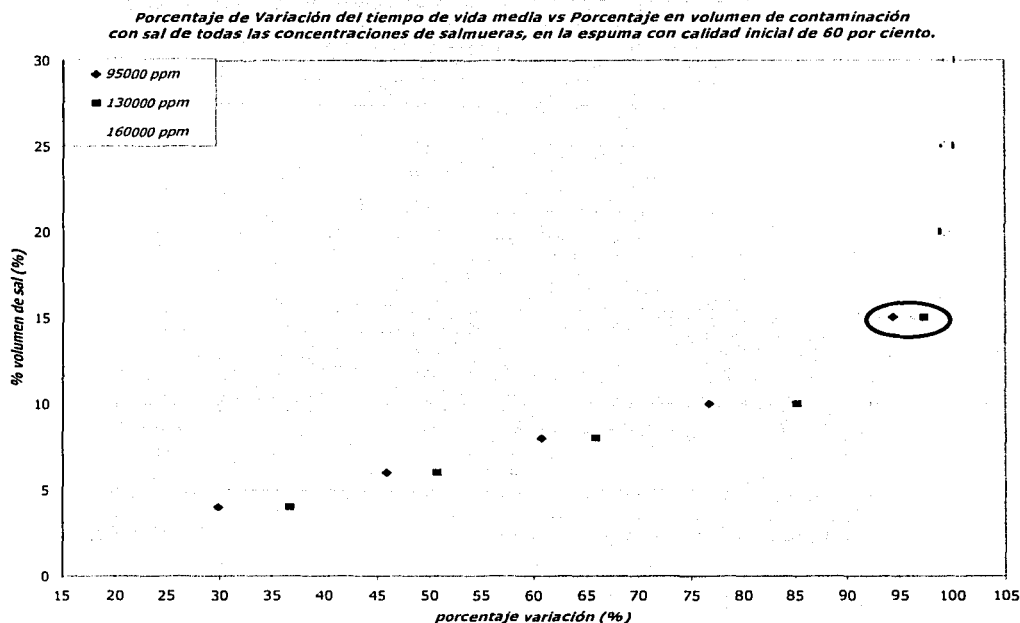


Fig. V.2. Porcentaje de variación del tiempo de vida media vs. Porcentaje en volumen de contaminación con sal de todas las concentraciones de salmueras, en la espuma con calidad inicial de 60 por ciento.

Obsérvese de nuevo el porcentaje de variación que se alcanza a una contaminación del 15% en volumen a diferentes concentraciones de salmuera, aquí también se observa una variación por encima del 90 por ciento en el tiempo de vida media.

Esta tendencia se mantiene en las demás concentraciones, (para mayor información remitirse al anexo B). Incluso en la última de ellas, de 90% de calidad de espuma, se puede observar:

V.- ANÁLISIS DE DATOS

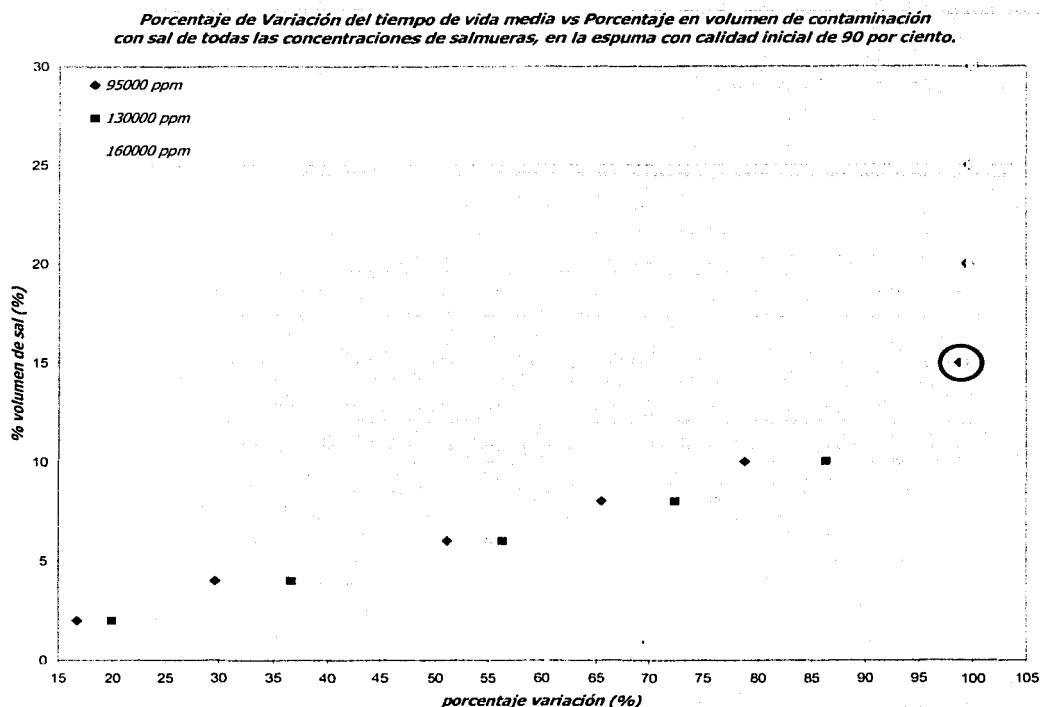


Fig. V.3. *Porcentaje de variación de la vida media vs. porcentaje de contaminación en volumen de sal para calidad de 90%.*

Como en todas las muestras tratadas, se tiene que la variación en el tiempo de vida media cuando se tiene una contaminación de sal del 15% en cualquier concentración sobrepasa el 90%; se ha decidido, evaluar los parámetros de estabilidad de la espuma hasta el dato inmediatamente anterior a este, que para este trabajo, es de 10% en volumen en concentración de sal, esto, por considerar que a 15% en volumen de sal, la espuma se rompe casi de inmediato.

TESIS CON
FALLA DE CUBIEN

V.- ANÁLISIS DE DATOS

Porcentaje de Variación del tiempo de vida media vs Porcentaje en volumen de contaminación con sal de todas las concentraciones de salmueras, en la espuma con calidad inicial de 80 por ciento.

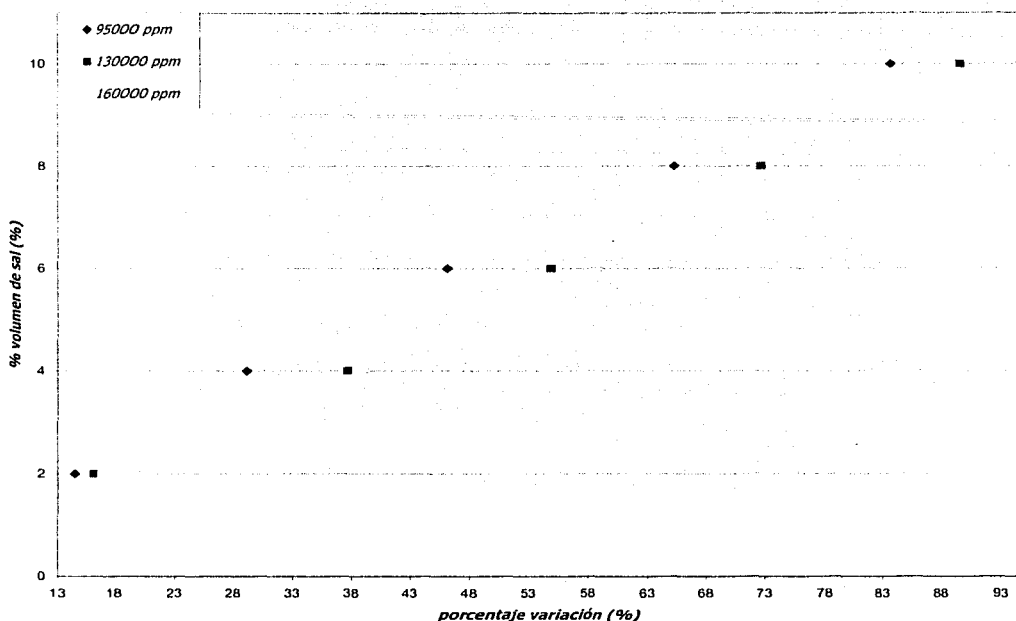


Fig. V.4. Porcentaje de variación de la vida media vs. porcentaje de contaminación en volumen de sal (hasta 10%) para calidad de 80%.

Definiendo este primer punto, se corrigen las diferentes gráficas para obtener solo los datos hasta una contaminación por sales del 10% en volumen. Así los datos obtenidos presentan la siguiente forma:

Nota:

Las gráficas completas y ampliadas, se presentan en el (anexo B).

Ahora bien, analizamos las gráficas obtenidas para cada concentración de salmueras (95000, 130000, 160000) con diferentes calidades, con las que se piensa determinar si hay algún tipo de patrón de comportamiento de las espumas. Estas gráficas, también son re-definidas para manejar los datos hasta 10% en volumen de contaminación de sal.

V.- ANÁLISIS DE DATOS

Al realizar dichas gráficas, se obtiene un patrón similar para cada tipo de concentración de sal, que viene dada como sigue:

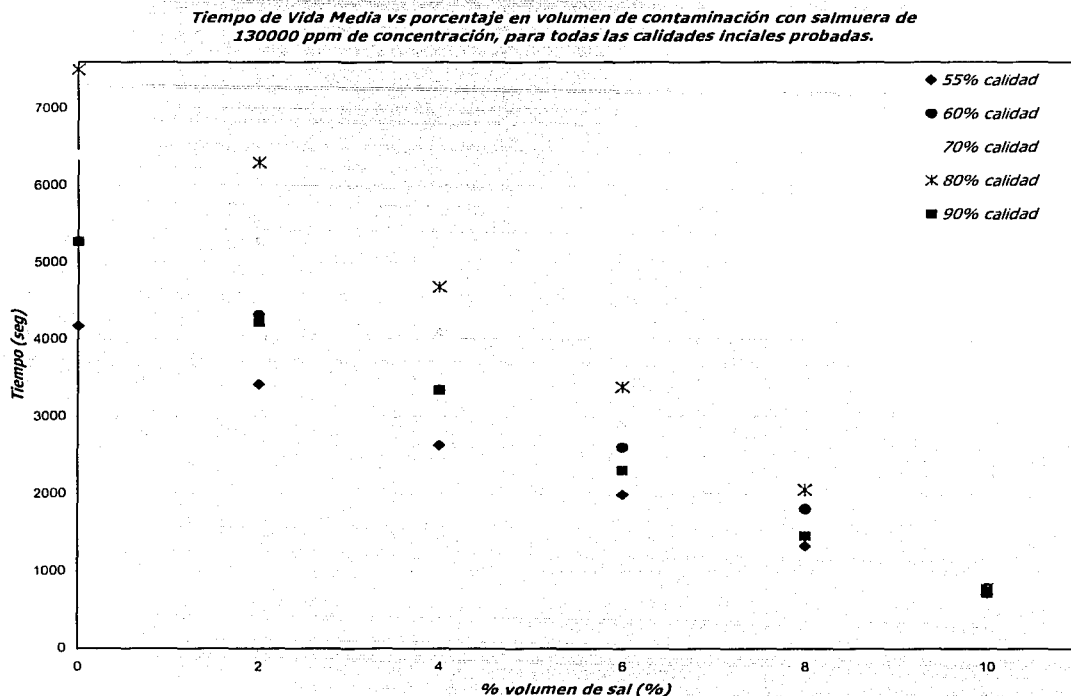


Fig. V.5. Tiempo de la vida media vs. Porcentaje en volumen de contaminación con salmuera de 130000 ppm de NaCl. A todas las calidades registradas.

Se puede observar en estas gráficas, que el tiempo de vida media para una muestra pura varía considerablemente dependiendo de la calidad de la espuma, presentándose un aumento progresivo del tiempo, desde una calidad de 55% por ciento, hasta una calidad de 80%; produciéndose una disminución de la misma desde 80% hasta 90% de calidad. Esto lleva a plantearse la primera inquietud:

¿Existe alguna relación cuantificable de la variación del tiempo de vida media con respecto a la calidad de la espuma, cuando esta se encuentra totalmente limpia?

V.- ANÁLISIS DE DATOS

Buscando resolver esta interrogante, se procede de la siguiente forma:

1. se hace el promedio de los datos obtenidos para las muestra limpias con una calidad de 55%, esto con el fin de fijar este valor como punto de partida del análisis. Así, se tiene que:

promedio de calidad de 55% es: $\Gamma_{55} = 4238 \text{ seg.}$

2. ahora bien, determinado el punto de partida, se procede a sacar los diferenciales de tiempo existentes entre las diferentes calidades, tomando como valor de ellas, los promedios obtenidos para las diferentes calidades así:

<i>calidades</i>	<i>Promedio tiempo de vida media (seg.)</i>	<i>Diferenciales</i>
55	4238	0
60	5270.33	1032.33
70	6397	1126.67
80	7514	1117
90	5258.33	-2255.67

Tabla V.21. Diferenciales entre los promedios de tiempo de vida media para muestras limpias.

3. Ahora bien, observando los diferenciales entre cada calidad, se puede ver una similitud entre ellos, a excepción del primer diferencial, ya que entre 55 y 60% hay un delta de 5% de calidad, mientras que en los demás, se tiene un delta de 10%, también se observa una tendencia diferente entre 80% y 90%, luego, para desarrollar un tipo de ecuación, se deberá al menos realizar dos discretizaciones, la primera, que vaya de una calidad de mayor a 55% a una de 80% y la otra de mayor de 80% hasta 90%

V.- ANÁLISIS DE DATOS

Así, partiendo de la base que la variación es de tipo lineal, se empieza a desarrollar alguna o algunas ecuaciones que reproduzcan en la forma mas acertada los datos obtenidos, de lo cual, se obtienen las siguientes expresiones:

Para una calidad de 55%, se tiene un rango de vida media de 4100 a 4300 seg.

Para un rango de calidades dado por:

$\Gamma > 55\%$ hasta $\Gamma = 80\%$ tenemos:

$$T_{vml} = 115 * \Gamma - 1650$$

Ec. - V.1

donde:

Γ = Calidad de la espuma en porcentaje.

T_{vml} = Tiempo de vida media de la espuma limpia (seg.)

esta relación, tiene una precisión dada por:

<i>calidades</i>	<i>Prom. Tiempo de vida media medido (seg.)</i>	<i>tiempo de vida media calculado (seg.)</i>	<i>% error</i>
55	4238	-----	-----
60	5270.33	5250	0.39
70	6397	6400	0.05
80	7514	7550	0.48

Tabla V.22. Comparación entre tiempos de vida medios calculados y medidos para espumas limpias entre 55 - 80% de calidad.

Para un rango de calidades dado por:

De $\Gamma > 80\%$ hasta $\Gamma = 90\%$ tenemos:

$$T_{vml} = 25870 - 229 * (\Gamma)$$

Ec. - V.2

V.- ANÁLISIS DE DATOS

Donde:

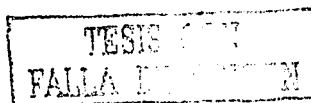
Γ = Calidad en el punto a medir (porcentaje).

<i>calidad</i>	<i>Prom. tiempo de vida media medido (seg.)</i>	<i>tiempo de vida media calculado (seg.)</i>	<i>% error</i>
90	5358.33	5260	0.03

Tabla V.23. Comparación entre tiempos de vida medios calculados y medidos para espumas limpias entre 80 – 90% de calidad.

4. Teniendo desarrolladas estas expresiones, se busca desarrollar una ecuación que modele el comportamiento de la vida media para la contaminación con salmuera, pero, se debe tener en cuenta que la salmuera tiene varias concentraciones, que determinan hasta cierto punto, el comportamiento de la estabilidad, como nos lo muestran mas claramente la siguiente gráfica de tiempo de vida media contra el porcentaje de contaminación con salmuera de hasta el 10% en volumen de diferentes concentraciones a diferentes calidades. (las gráficas completas se muestran en el anexo B).

En estas gráficas, se observa una tendencia de convergencia hacia algún punto determinado de volumen de contaminación, por lo que se ha decidido asumir que efectivamente existe una concentración de sal, donde el tiempo de vida media es el mismo para cualquier tipo de concentración de salmuera que se tenga, teniendo en cuenta que a 15% de concentración en volumen de sal ya se tenía un abatimiento casi inmediato de la estabilidad de la sal, se asume la concentración de 10 por ciento, como el límite superior de la posibilidad de contaminación si tener un abatimiento inmediato de la espuma.



V.- ANÁLISIS DE DATOS

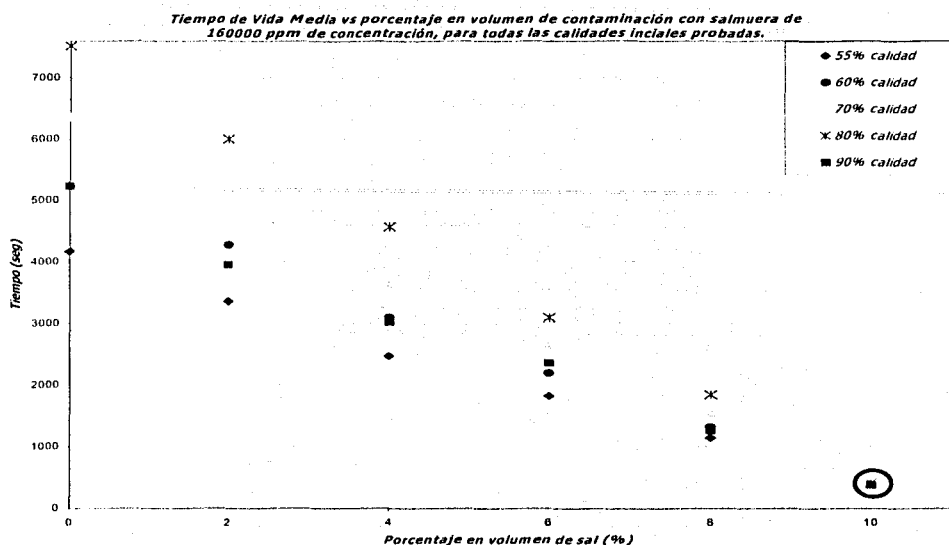


Fig. V.6. Tiempo de la vida media vs. porcentaje de contaminación en volumen de sal para una salmuera de 160000 (ppm) de NaCl.

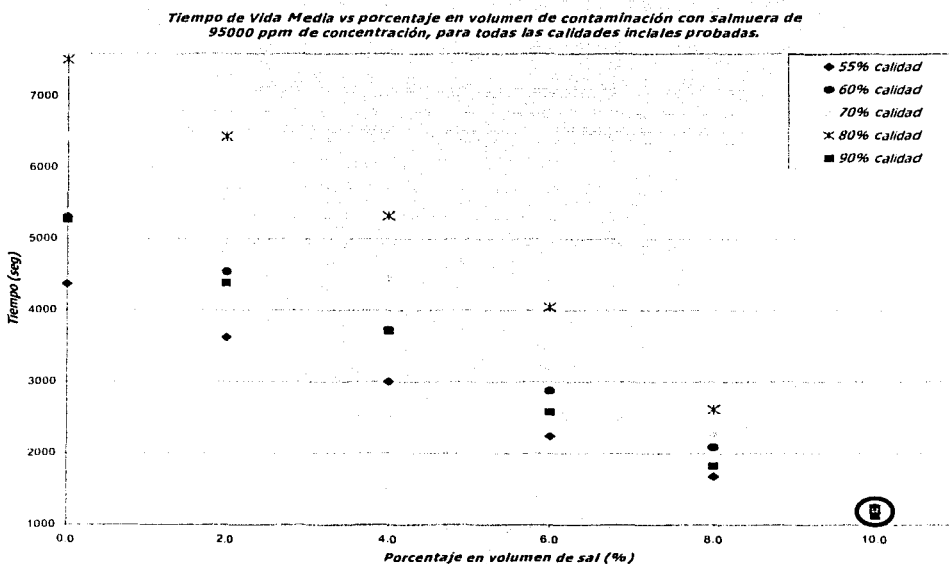


Fig. V.7. Tiempo de la vida media vs. porcentaje de contaminación en volumen de sal para una salmuera de 130000 (ppm) de NaCl.

V.- ANÁLISIS DE DATOS

Ahora bien, considerando que 10% de contaminación en volumen de salmuera es el límite superior de nuestra estabilidad, se debe determinar, en que forma influencia la concentración de la sal en el agua en la determinación de dicho punto, por lo que se desarrolla lo siguiente:

- 4.1. Se saca un promedio aritmético de los valores a 10% de contaminación en volumen de salmuera obtenidos a las diferentes concentraciones, el cual se asume como el valor al cual convergen las diferentes calidades cuando se contaminan con ese volumen de sal a una concentración específica de salmuera.
- 4.2. Se grafican estos valores de tiempo de vida medios a 10% de contaminación en volumen de salmuera a diferentes concentraciones (obtenidos en el punto 4.1) contra las concentraciones de sal en la salmuera, obteniéndose:

*promedio tiempo de vida media a 10% de contaminación
en volumen de sal vs concentración de sal en la salmuera (ppm)*

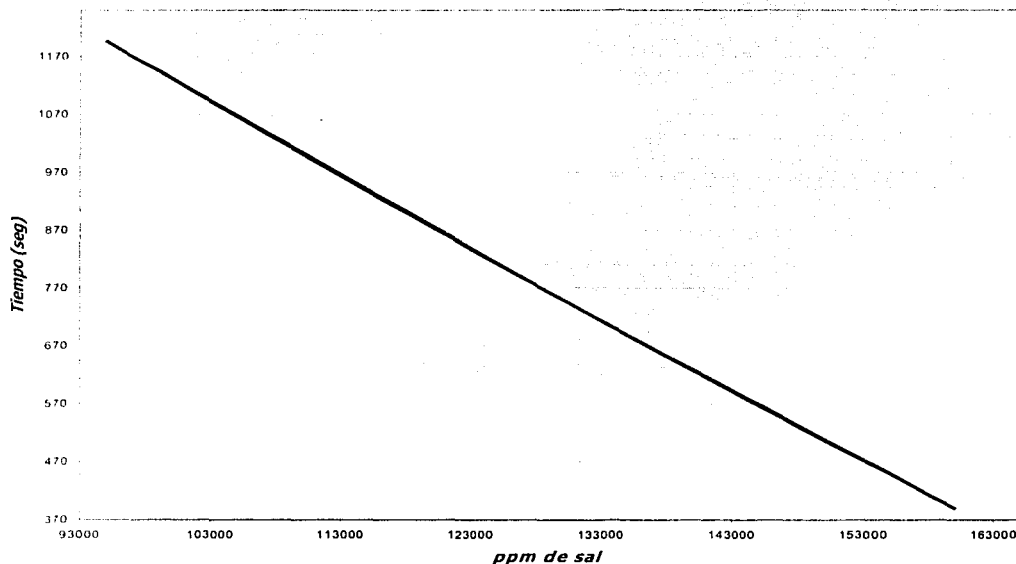


Fig. V.8. Promedio de Tiempo de la vida media a 10% en volumen de contaminación de sal vs. concentración de NaCl en la salmuera (ppm).

V.- ANÁLISIS DE DATOS

Esta tendencia es modelada para obtener una expresión del tiempo de vida media a 10% en volumen de contaminación con sal a diferentes concentraciones de salmuera.

$$tvm_{10(c)} = -0.0123 * c + 2356.7$$

Ec. - V.3

Ecuación para concentración de sal en las salmueras de (95000 – 160000) ppm

donde:

$tvm_{10(c)}$ = Tiempo de vida media a 10% en volumen de contaminación de una salmuera con concentración específica de sal (seg.).

c = Concentración de sal en la salmuera (ppm).

Concentración de salmuera en (ppm)	tiempo de vida media a 10% promedio (seg.)	tiempo de vida media a 10% calculado (seg.)	% error
95000	1196.4	1188.2	0.69
130000	749.2	757.7	1.12
160000	390	388.7	0.33

Tabla V.24. Comparación entre tiempos de vida medios calculados y medidos a 10% de contaminación en volumen para las diferentes salmueras.

Ahora bien, regresando a las figuras (V.6) y (V.7) se puede apreciar una tendencia lineal de comportamiento, por lo que se busca realizar esta adaptación. gráficamente, esta tendencia se puede apreciar:

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

V.- ANÁLISIS DE DATOS

Tiempo de Vida Media vs porcentaje en volumen de contaminación con salmuera de 130000 ppm de concentración, para todas las calidades iniciales probadas.

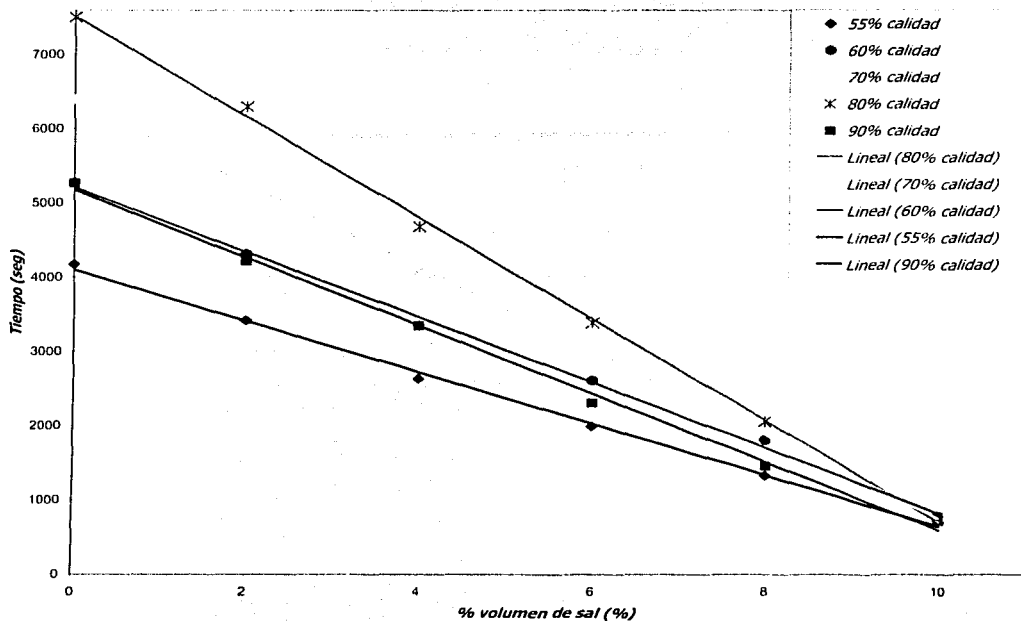


Fig. V.9. Tiempo de la vida media vs. porcentaje de contaminación en volumen de sal para una salmuera de 95000 (ppm) de NaCl.

Para proponer un modelo de tipo lineal, se debe tener una ecuación de la siguiente forma:

$$Y = mX + B$$

Ec. - V.4

donde:

Y = Variable dependiente, que sería el tiempo de vida media de la espuma.

X = Variable independiente, para nuestro caso, sería el porcentaje de contaminación en volumen de sal.

B = sería el punto de intercepción cuando la variable X fuese igual a cero, que para este caso, es el momento cuando la espuma no tiene la influencia de ningún contaminante, es decir, cuando está limpia.

V.- ANÁLISIS DE DATOS

m = Pendiente de la ecuación que viene dada como:

$$m = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}$$

Ec.- V.5

tomando en cuenta que la variable independiente X es la contaminación en volumen de sal en la espuma, y que Y es el tiempo de vida media.

Tomo los siguientes pares coordenados:

$$X_1 = 0$$

$$X_2 = 10\%$$

$$Y_1 = T_{vml}$$

$$Y_2 = T_{v10(c)}$$

Es decir, la pendiente de la ecuación, sería:

$$m = \frac{T_{vm10(c)} - T_{vml}}{10 - 0} = \frac{T_{vm10(c)} - T_{vml}}{10}$$

Ec.- V.6

encontrada la pendiente, la ecuación que predice el comportamiento de la vida media de la espuma con la influencia de contaminantes en porcentaje en volumen, siendo el contaminante una salmuera con una concentración de sal específica, sería:

$$T_{vmc} = \frac{(T_{vm10(c)} - T_{vml})}{10} * (pc) + T_{vml}$$

Ec.- V.7

Donde:

pc = Porcentaje de contaminación existente en la salmuera.

T_{vmc} = Tiempo de vida media de la espuma a cualquier porcentaje en volumen de contaminación

V.- ANÁLISIS DE DATOS

A continuación, se muestran algunas comparaciones de datos generados con esta ecuación (las demás tablas, se presentan en el anexo B):

(%) en volumen de contaminación con salmuera de 95000 ppm	Tiempos de vida media espuma de $\Gamma = 60\%$		
	Calculado	Medido	% error
2	4544	4438.04	2.332
4	3724	3626.08	2.629
6	2873	2814.12	2.049
8	2083	2002.16	3.881
10	1236	1190.20	3.706

Tabla V.25. Comparación entre tiempos de vida medios calculados y medidos para espumas de 60% de calidad a diferentes concentraciones de contaminante (salmuera de 95000 ppm).

V.2.3- Análisis de resultados corrigiendo la calidad de espuma por el porcentaje de contaminación de salmuera:

En el análisis estadístico, se observó que la interacción de influencia de las variables calidad y porcentaje de contaminación con salmuera, tienen muy poca o casi ninguna interacción con respecto al porcentaje de variación de la variable dependiente tiempo de vida media, esto se debe primordialmente a que tienen una influencia idéntica, conforme sus niveles altos o bajos se presentan, es decir, cuando se conjugan las dos variables independientes tratadas (calidad y porcentaje de contaminación con salmuera), tienen un patrón de comportamiento idéntico, tanto si se conjuga un alto porcentaje de contaminación con salmuera y una calidad alta, como si se tiene un bajo porcentaje de contaminación con salmuera, para una calidad alta, teniendo por supuesto, una variación entre una y otra, sin embargo, es esta variación la que se mantiene idéntica, al invertir las condiciones de conjugación de las variables, por lo que las rectas dada para los dos niveles (alto y Bajo) de porcentaje de contaminación con salmuera, se mantenga casi paralelas.

Sin embargo, para realizar un mayor análisis de los fenómenos tratados, se hace una corrección de los datos obtenidos para las diferentes calidades de espuma con los

V.- ANÁLISIS DE DATOS

diferentes porcentajes de contaminación con el fin de observar mas claramente las posibles interacciones existentes entre unos y otros.

Para este fin, se realizan las correcciones de la calidad teniendo en cuenta el volumen de contaminante agregado a la espuma y recalculando la nueva calidad, así:

Para una calidad inicial de espuma de 55 por ciento, la corrección sería:

<i>Corrección de la calidad inicial 55% por contaminación con salmuera de 95000 ppm Tomando como base 100 ml de mezcla entre espuma y contaminante.</i>				
Porcentaje de contaminación	Volumen de Líquido	Volumen de gas	Calidad	Tiempo de Vida Media
% Volumen	ml	ml	% Volumen	Seg.
0	45.0	55.0	55.0	4372
2	46.1	53.9	53.9	3625
4	47.2	52.8	52.8	2998
6	48.3	51.7	51.7	2237
8	49.4	50.6	50.6	1673
10	50.5	49.5	49.5	1197
15	53.3	46.8	46.8	278
20	56.0	44.0	44.0	36
25	58.8	41.3	41.3	33
30	61.5	38.5	38.5	23

Tabla V.26. Corrección de la calidad debido a la contaminación con salmuera de 95000 ppm, para una espuma de calidad inicial de 55 %.

Como se puede observar para este caso en específico, para una calidad inicial de 55%, que es el límite inferior de la calidad para seguir considerando a la mezcla como una espuma, se observa que al realizar las correcciones, se sale del rango mínimo, por lo que para realizar la corrección, se tomarán los datos que ya corregidos, se encuentren por encima de 55 por ciento en volumen de gas (en nuestro caso de aire). Así, tomando los datos ya corregidos para una calidad de 60 por ciento, se tiene:

Para una calidad inicial de espuma de 60 por ciento, la corrección sería:

V.- ANÁLISIS DE DATOS

Corrección de la calidad inicial 60% por contaminación con salmuera de 95000 ppm Tomando como base 100 ml de mezcla entre espuma y contaminante.				
Porcentaje de contaminación	Volumen de Líquido	Volumen de gas	Calidad	Tiempo de Vida Media
% Volumen	ml	ml	% Volumen	Seg.
0	40.0	60	60	5310
2	41.2	58.8	58.8	4544
4	42.4	57.6	57.6	3724
6	43.6	56.4	56.4	2873
8	44.8	55.2	55.2	2083
10	46.0	54	54	1236
15	49.0	51	51	299
20	52.0	48	48	35
25	55.0	45	45	34
30	58.0	42	42	16

Tabla V.27. Corrección de la calidad debido a la contaminación con salmuera de 95000 ppm, para una espuma de calidad inicial de 60 %.

En esta tabla, se puede observar que solo los cinco primeros valores corregidos, son susceptibles al presente análisis ya que solo estos, se encuentran por encima de 55 por ciento en calidad, es decir, estos cinco datos, aún entran en el rango de valores de calidad necesarios para considerar la mezcla como una espuma. Cabe anotar que los valores por debajo de 55 por ciento, son considerados como líquidos aireados.

Realizando una comparación con respecto a los valores de tiempo de vida media que se tendrían, a estas calidades, si la espuma fuese limpia, se puede establecer la siguiente tabla:

Corrección de la calidad debido a la contaminación con salmuera de 95000 ppm para Una espuma de 60% de calidad inicial			
Calidad	Tiempo de Vida Media (Segundos)		Variación
(% en Volumen)	Medido	Calculado	(%)
60	5310	5250	1.13
58.8	4544	5112	12.50
57.6	3724	4974	33.57
56.4	2873	4533	57.78
55.2	2083	4395	110.99

Tabla V.28. Corrección y comparación de la calidad debido a la contaminación con salmuera de 95000 ppm, para una espuma de calidad inicial de 60 %.

V.- ANÁLISIS DE DATOS

Para el cálculo del tiempo de vida media calculado en la tabla anterior, se utiliza la ecuación (V.1).

Gráficamente esta comparación viene dada por la figura (V.10).

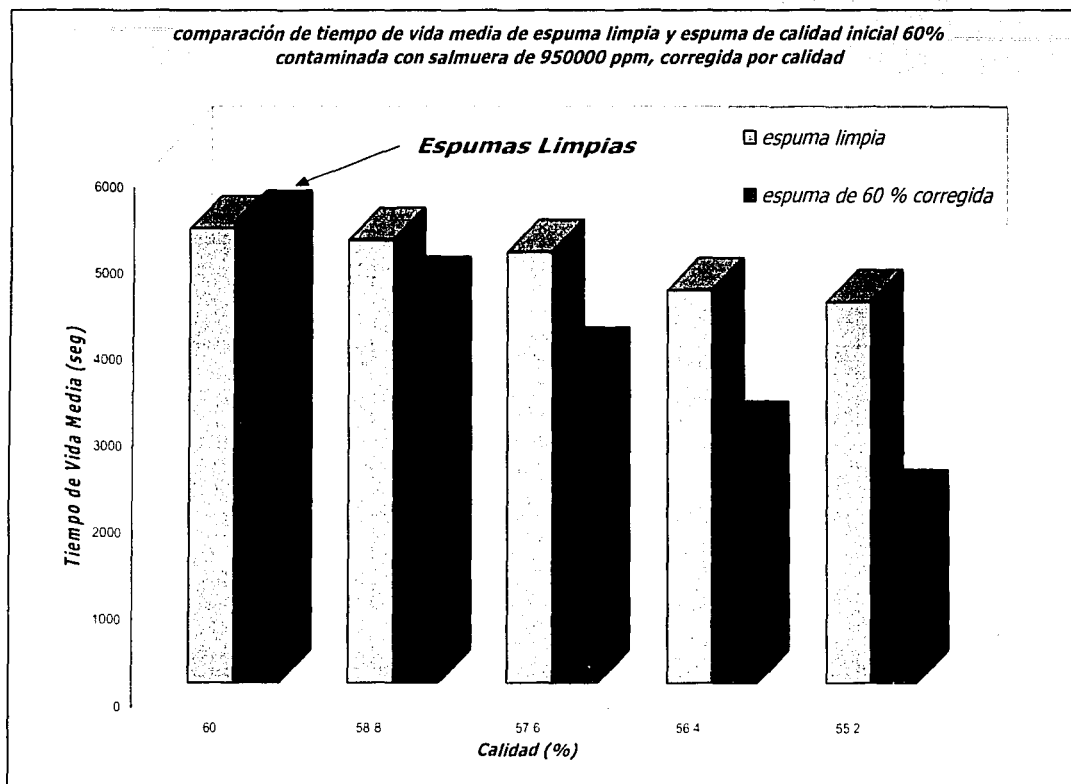


Figura V.10. Comparación de tiempos de vida media de espuma limpia y Espuma de calidad inicial 60% contaminada con salmuera de 95000 ppm, corregida por calidad.

Nótese que las primeras barras ubicadas en una calidad de 60%, corresponden a las espumas limpias, calculadas y medidas.

Este mismo procedimiento se aplica para esta misma calidad y diferentes concentraciones de sal (NaCl) en la salmuera. Entonces, para una salmuera de 130000 (ppm) de concentración de (NaCl) y una calidad inicial de 60% se tiene.

V.- ANÁLISIS DE DATOS

Nota:

Igual procedimiento, se realiza para las espumas con calidades restantes y con las diferentes concentraciones de (NaCl) en la salmuera.

<i>Corrección de la calidad inicial 60% por contaminación con salmuera de 130000 ppm Tomando como base 100 ml de mezcla entre espuma y contaminante.</i>				
Porcentaje de contaminación	Volumen de Líquido	Volumen de gas	Calidad	Tiempo de Vida Media
% Volumen	ml	ml	% Volumen	Seg.
0	40.0	60	60	5310
2	41.2	58.8	58.8	4544
4	42.4	57.6	57.6	3724
6	43.6	56.4	56.4	2873
8	44.8	55.2	55.2	2083
10	46.0	54	54	1236
15	49.0	51	51	299
20	52.0	48	48	35
25	55.0	45	45	34
30	58.0	42	42	16

Tabla V.29. Corrección de la calidad debido a la contaminación con salmuera de 130000 ppm, para una espuma de calidad inicial de 60 %.

De igual forma, realizando la comparación con el tiempo de vida media que se tendría con una espuma limpia a dichas calidades (utilizando la ecuación V.1), se tiene:

<i>Corrección de la calidad debido a la contaminación con salmuera de 130000 ppm para Una espuma de 60% de calidad inicial</i>			
Calidad	Tiempo de Vida Media (Segundos)		Variación
(% en Volumen)	Medido	Calculado	(%)
60	5272	5250	0.42
58.8	4312	5112	18.55
57.6	3341	4974	48.88
56.4	2600	4836	86.00
55.2	1799	4698	161.15

Tabla V.30. Corrección y comparación de la calidad debido a la contaminación con salmuera de 130000 ppm, para una espuma de calidad inicial de 60 %.

V.- ANÁLISIS DE DATOS

De igual forma, en forma gráfica se puede observar:

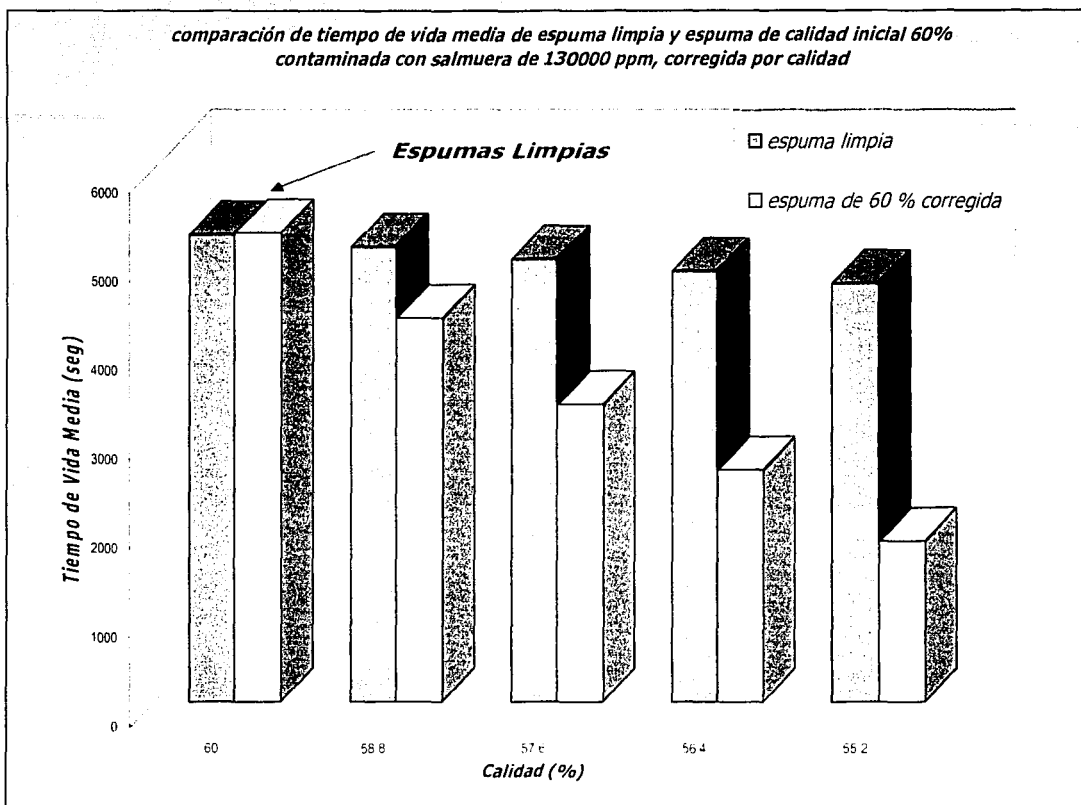


Figura V.11. Comparación de tiempos de vida media de espuma limpia y Espuma de calidad inicial 60% contaminada con salmuera de 130000 ppm, corregida por calidad.

Aplicando el mismo procedimiento para una calidad inicial de espuma de 60 por ciento, y una contaminación de 160000 (ppm) se tendría:

V.- ANÁLISIS DE DATOS

Corrección de la calidad inicial 60% por contaminación con salmuera de 160000 ppm Tomando como base 100 ml de mezcla entre espuma y contaminante.				
Porcentaje de contaminación	Volumen de Líquido	Volumen de gas	Calidad	Tiempo de Vida Media
% Volumen	ml	ml	% Volumen	Seg.
0	40.0	60	60	5229
2	41.2	58.8	58.8	4274
4	42.4	57.6	57.6	3101
6	43.6	56.4	56.4	2188
8	44.8	55.2	55.2	1312
10	46.0	54	54	389
15	49.0	51	51	192
20	52.0	48	48	24
25	55.0	45	45	23
30	58.0	42	42	12

Tabla V.31. Corrección de la calidad debido a la contaminación con salmuera de 160000 ppm, para una espuma de calidad inicial de 60 %.

Realizando la comparación con los datos de una espuma limpia de las mismas calidades, se obtiene:

Corrección de la calidad debido a la contaminación con salmuera de 160000 ppm para Una espuma de 60% de calidad inicial			
Calidad	Tiempo de Vida Media (Segundos)		Variación
(% en Volumen)	Medido	Calculado	(%)
60	5229	5250	0.40
58.8	4274	5112	19.61
57.6	3101	4974	60.40
56.4	2188	4836	121.02
55.2	1312	4698	258.08

Tabla V.32. Corrección y comparación de la calidad debido a la contaminación con salmuera de 160000 ppm, para una espuma de calidad inicial de 60 %.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

V.- ANÁLISIS DE DATOS

Gráficamente, esta comparación viene dada por:

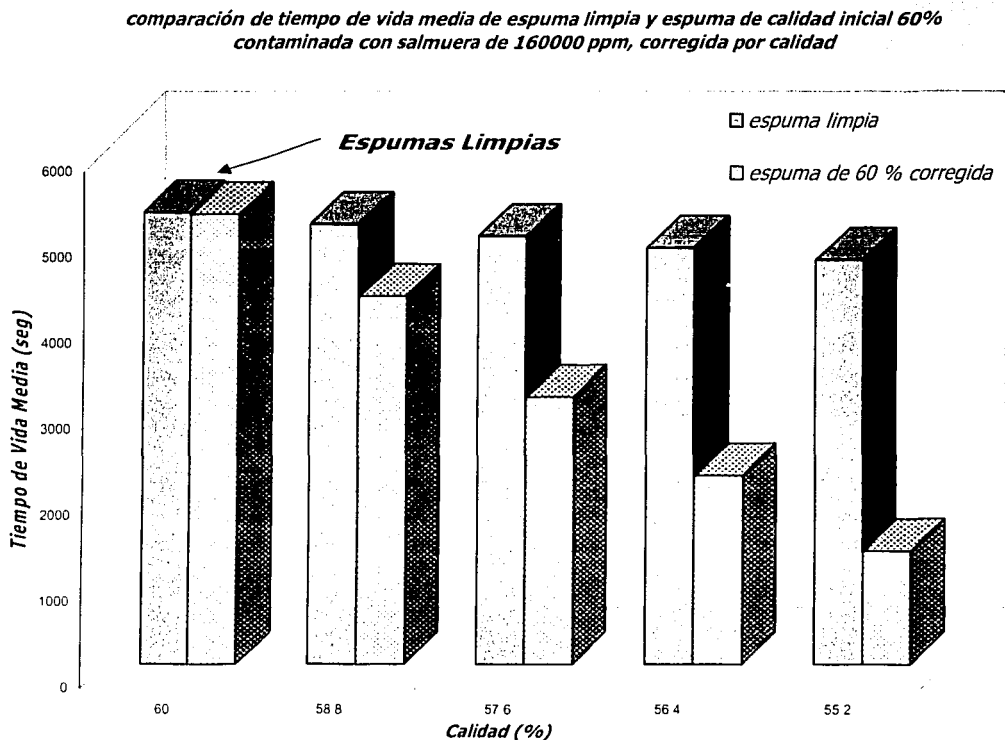


Figura V.12. Comparación de tiempos de vida media de espuma limpia y Espuma de calidad inicial 60% contaminada con salmuera de 160000 ppm, corregida por calidad.

Ahora bien, realizando la comparación gráfica entre los diferentes datos de calidad de la espuma contaminada con las tres concentraciones de salmueras partiendo de una calidad inicial de 60 por ciento, se tiene:

TESIS
FALLA DE

comparación de tiempo de vida media de espuma limpia y espuma de calidad inicial 60% contaminada con todas las concentraciones de salmuera, corregidas por calidad

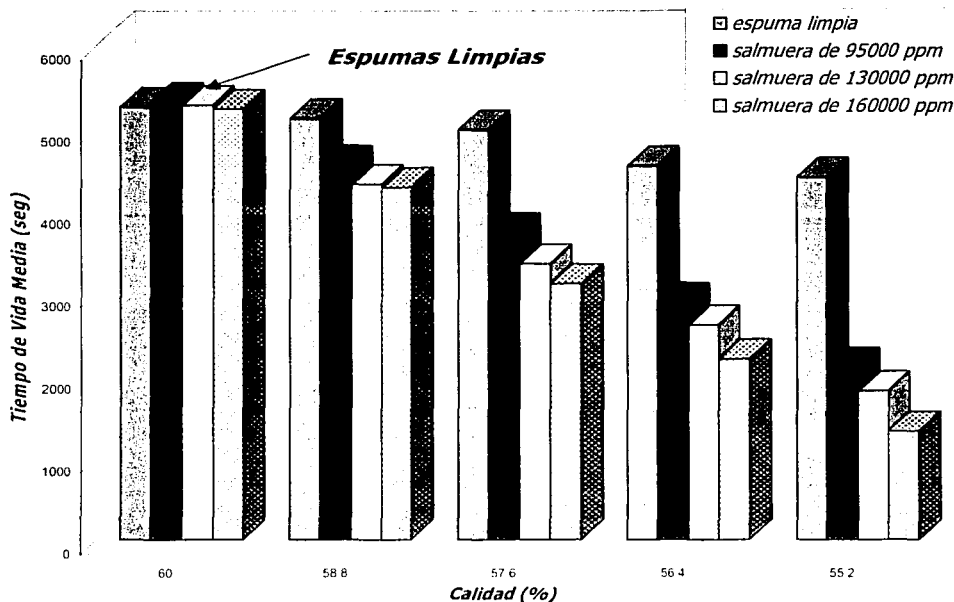


Figura V.13. Comparación del tiempo de vida media de espuma limpia y espuma de calidad inicial de 60% contaminada con todas las concentraciones de salmuera, corregidas por calidad.

Como ya se había mencionado, este mismo procedimiento, se aplica a todas las demás calidades iniciales tratadas, dichos resultados y gráficas, se muestran en el **(Anexo D)** de la presente tesis.

De los datos y las gráficas anteriores, se puede observar la influencia activa que tiene el porcentaje de contaminación con salmuera, sobre el tiempo de vida media de la espuma, así como, en la gráfica (V.11) de igual forma, se puede observar la influencia que sobre el tiempo de vida media de la espuma, tiene la concentración de (NaCl) en la salmuera, esto último, se puede observar en la diferencia en los porcentajes de variación y en la diferencia decreciente entre las barras que indican el tiempo de vida media para la espuma de calidad inicial de 60% contaminada con las diferentes salmueras.

V.- ANÁLISIS DE DATOS

Es interesante realizar el mismo análisis para la calidad inicial de la espuma de 90 por ciento, esto por que para el manejo de las ecuaciones de la espuma limpia, se deben conjugar las ecuaciones (V.1) y (V.2). el análisis viene dado por:

<i>Corrección de la calidad inicial 90% por contaminación con salmuera de 95000 ppm Tomando como base 100 ml de mezcla entre espuma y contaminante.</i>				
Porcentaje de contaminación	Volumen de Líquido	Volumen de gas	Calidad	Tiempo de Vida Media
% Volumen	ml	ml	% Volumen	Seg.
0	10.0	90	90	5273
2	11.8	88.2	88.2	4389
4	13.6	86.4	86.4	3709
6	15.4	84.6	84.6	2579
8	17.2	82.8	82.8	1821
10	19.0	81	81	1122
15	23.5	76.5	76.5	67
20	28.0	72	72	31
25	32.5	67.5	67.5	18
30	37.0	63	63	10

Tabla V.33. Corrección de la calidad debido a la contaminación con salmuera de 95000 ppm, para una espuma de calidad inicial de 90 %.

Realizando la comparación con los datos de espumas limpias, se tiene.

<i>Corrección de la calidad debido a la contaminación con salmuera de 95000 ppm para Una espuma de 90% de calidad inicial</i>			
Calidad	Tiempo de Vida Media (Segundos)		Variación
(% en Volumen)	Medido	Calculado	(%)
90	5273	5260	0.25
88.2	4389	5672.2	29.24
86.4	3709	6084.4	64.04
84.6	2579	6496.6	151.90
82.8	1821	6908.8	279.40
81	1122	7321	552.50
76.5	67	7147.5	10,567.91
72	31	6630	21,287.10
67.5	18	6112.5	33,858.33
63	10	5595	55,850.00

Tabla V.34. Corrección y comparación de la calidad debido a la contaminación con salmuera de 95000 ppm, para una espuma de calidad inicial de 90 %.

V.- ANÁLISIS DE DATOS

Gráficamente dicho cambio viene dado por:

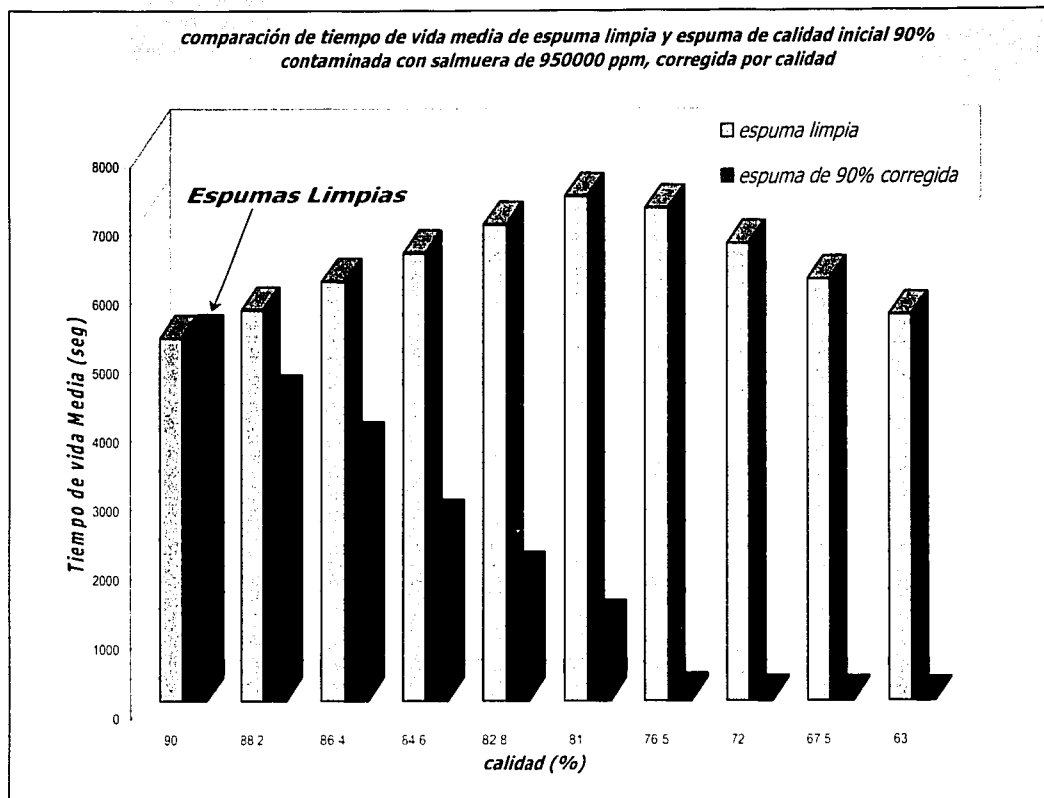


Figura V.14. Comparación de tiempos de vida media de espuma limpia y Espuma de calidad inicial 90% contaminada con salmuera de 95000 ppm, corregida por calidad.

En esta gráfica, es importante observar que se tienen unas variaciones mas marcadas al realizar la comparación con los datos de tiempo de vida media de la espuma limpia.

Para una contaminación con salmuera de 130000 ppm, se tiene:

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

V.- ANÁLISIS DE DATOS

<i>Corrección de la calidad inicial 90% por contaminación con salmuera de 130000 ppm Tomando como base 100 ml de mezcla entre espuma y contaminante.</i>				
Porcentaje de contaminación	Volumen de Líquido	Volumen de gas	Calidad	Tiempo de Vida Media
% Volumen	ml	ml	% Volumen	Seg.
0	10.0	90	90	5272
2	11.8	88.2	88.2	4220
4	13.6	86.4	86.4	3342
6	15.4	84.6	84.6	2303
8	17.2	82.8	82.8	1455
10	19.0	81	81	722
15	23.5	76.5	76.5	42
20	28.0	72	72	18
25	32.5	67.5	67.5	11
30	37.0	63	63	1

Tabla V.35. Corrección de la calidad debido a la contaminación con salmuera de 130000 ppm, para una espuma de calidad inicial de 90 %.

Realizando la comparación con la espuma limpia se tiene:

<i>Corrección de la calidad debido a la contaminación con salmuera de 130000 ppm para Una espuma de 90% de calidad inicial</i>			
Calidad (% en Volumen)	Tiempo de Vida Media (Segundos)		Variación (%)
	Medido	Calculado	
90	5272	5260	0.23
88.2	4220	5672.2	34.41
86.4	3342	6084.4	82.06
84.6	2303	6496.6	182.09
82.8	1455	6908.8	374.83
81	722	7321	913.99
76.5	42	7147.5	16,917.86
72	18	6630	36,733.33
67.5	11	6112.5	55,468.18
63	1	5595	559,400.00

Tabla V.34. Corrección y comparación de la calidad debido a la contaminación con salmuera de 130000 ppm, para una espuma de calidad inicial de 90 %.

Gráficamente se representa:

comparación de tiempos de vida media para espuma limpia y espuma de calidad inicial 90% contaminada con salmuera de 130000 ppm y corregida por calidad

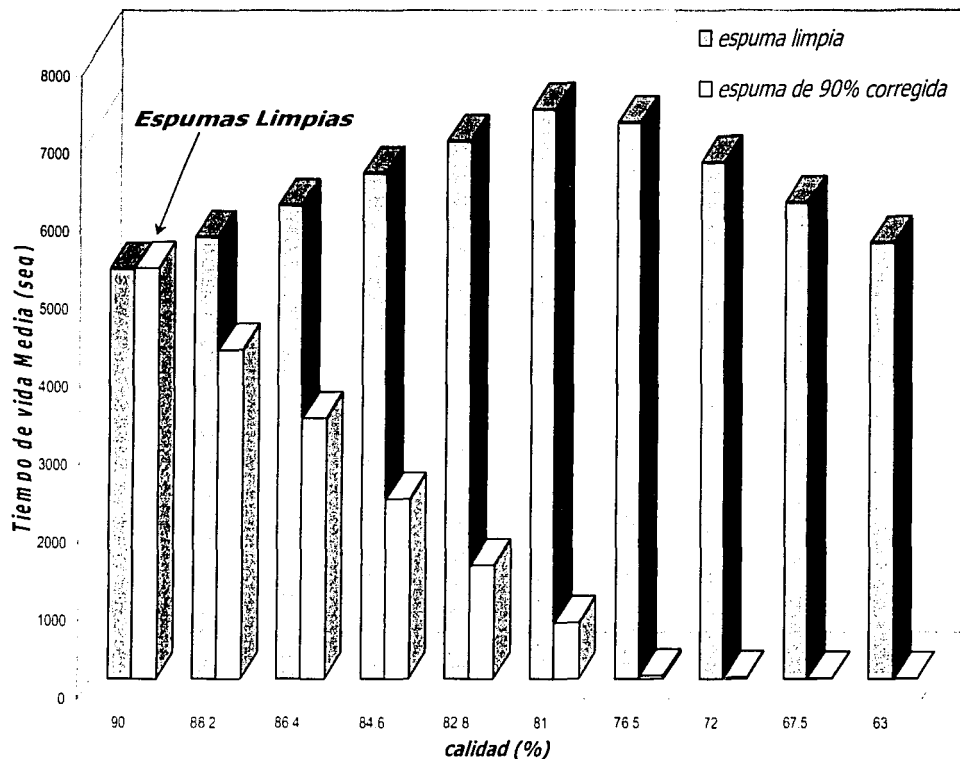


Figura V.15. Comparación de tiempos de vida media de espuma limpia y Espuma de calidad inicial 90% contaminada con salmuera de 130000 ppm, corregida por calidad.

En esta gráfica, se sigue observando la variación mas marcada del tiempo de vida media de la espuma contaminada, con respecto a la espuma limpia.

Así, realizando este análisis para una espuma de calidad inicial de 90% y contaminación con salmuera de 160000 ppm, se tiene:

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

V.- ANÁLISIS DE DATOS

*Corrección de la calidad inicial 90% por contaminación con salmuera de 160000 ppm
Tomando como base 100 ml de mezcla entre espuma y contaminante.*

Porcentaje de contaminación	Volumen de Líquido	Volumen de gas	Calidad	Tiempo de Vida Media
% Volumen	ml	ml	% Volumen	Seg.
0	10.0	90	90	5230
2	11.8	88.2	88.2	3957
4	13.6	86.4	86.4	3024
6	15.4	84.6	84.6	2354
8	17.2	82.8	82.8	1254
10	19.0	81	81	376
15	23.5	76.5	76.5	33
20	28.0	72	72	10
25	32.5	67.5	67.5	8
30	37.0	63	63	3

Tabla V.36. Corrección de la calidad debido a la contaminación con salmuera de 160000 ppm, para una espuma de calidad inicial de 90 %.

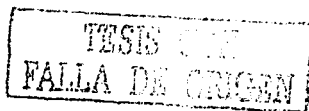
Realizando la comparación con la espuma limpia se tiene:

*Corrección de la calidad debido a la contaminación con salmuera de 160000 ppm para
Una espuma de 90% de calidad inicial*

Calidad (% en Volumen)	Tiempo de Vida Media (Segundos)		Variación (%)
	Medido	Calculado	
90	5230	5260	0.57
88.2	3957	5672.2	43.35
86.4	3024	6084.4	101.20
84.6	2354	6496.6	175.98
82.8	1254	6908.8	450.94
81	376	7321	1,847.07
76.5	33	7147.5	21,559.09
72	10	6630	66,200.00
67.5	8	6112.5	76,306.25
63	3	5595	186,400.00

Tabla V.37. Corrección y comparación de la calidad debido a la contaminación con salmuera de 160000 ppm, para una espuma de calidad inicial de 90 %.

Gráficamente se representa:



V.- ANÁLISIS DE DATOS

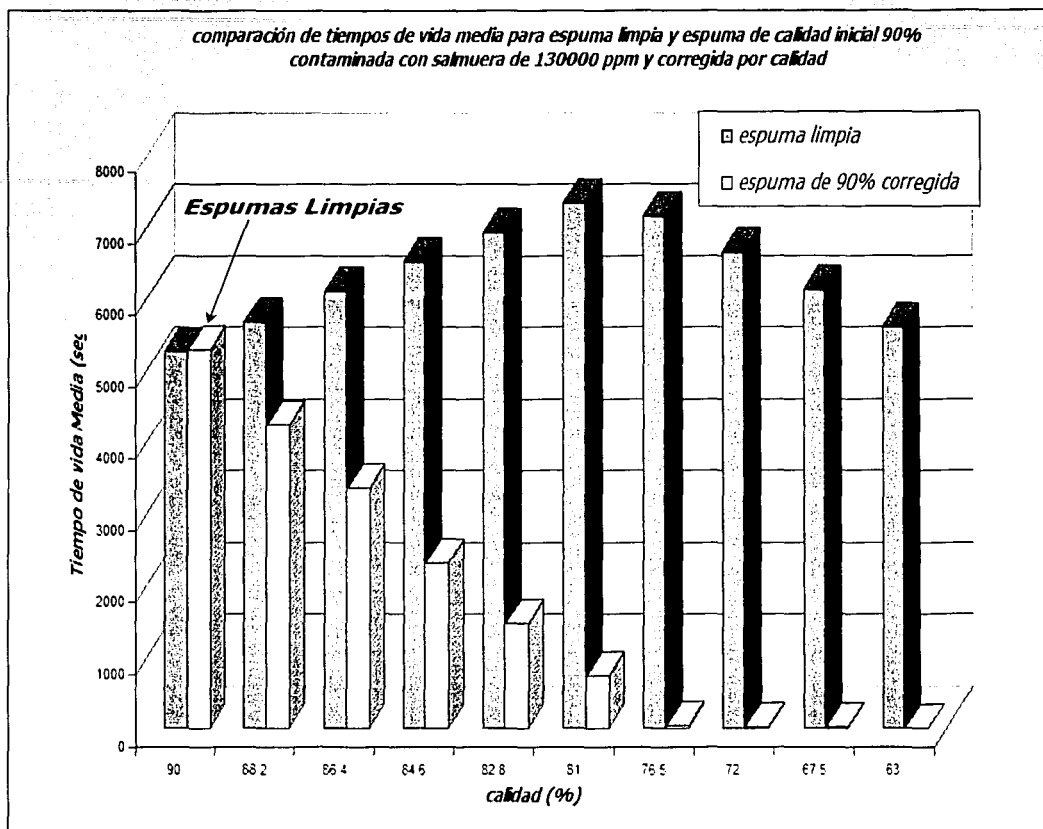


Figura V.16. Comparación de tiempos de vida media de espuma limpia y Espuma de calidad inicial 90% contaminada con salmuera de 160000 ppm, corregida por calidad.

Ahora bien, realizando la comparación gráfica entre los diferentes datos de calidad de la espuma contaminada con las tres concentraciones de salmueras partiendo de una calidad inicial de 60 por ciento, se tiene:

TESIS CON
FALLA DE CREEN

V.- ANÁLISIS DE DATOS

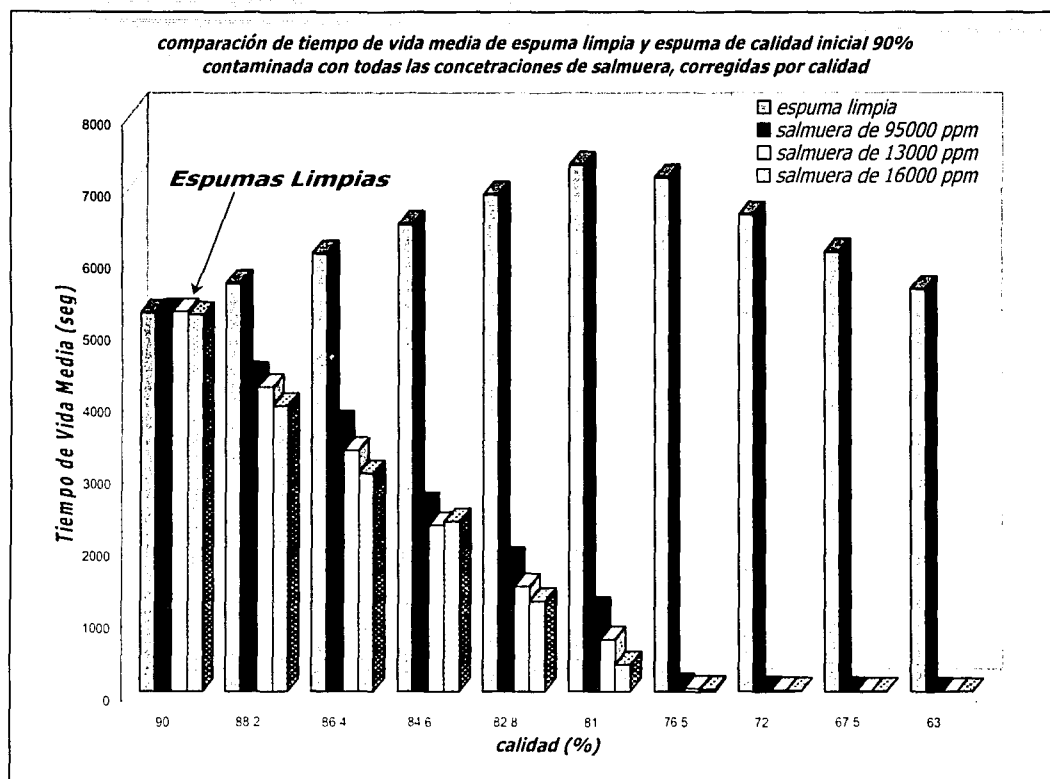


Figura V.17. Comparación del tiempo de vida media de espuma limpia y espuma de calidad inicial de 90% contaminada con todas las concentraciones de salmuera, corregidas por calidad.

En esta última gráfica, se puede apreciar aún mas, el efecto que tiene el porcentaje de contaminación con salmuera, así como la influencia que tiene la concentración de (NaCl) en dicha salmuera, esto se puede apreciar por la tendencia descendente conforme se tiene mayor entrada de contaminación y la variación más marcada de estos tiempos, conforme se tiene una concentración mayor de sal (NaCl) dentro de la salmuera.

Los datos completos, se pueden apreciar en el **(apéndice D)**.

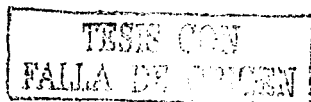
V.2.4- Análisis de resultados para pruebas con Aceite Diesel:

En estas pruebas, se observó que la espuma en sus diferentes concentraciones, no lograba retener al aceite diesel, por lo que los volúmenes agregados a cada muestra, se segregaban de inmediato, apenas se dejaba de mezclar y agitar, el aceite en su totalidad, se segregaba.

Lo que se puede deducir de esto, es que la espuma no logra mantener suspendido al aceite, por lo que este tiende a agruparse en baches que se asientan gracias a la diferencia de densidades existente entre el mismo aceite y la espuma.

Luego, las pruebas para comprobar la estabilidad de la espuma por medio del tiempo de vida media, suponiendo que la espuma retendría el aceite, fueron totalmente innecesarias por lo menos, para este tipo de pruebas que son de carácter estático.

Estas observaciones nos llevan a replantear las propuestas teóricas realizadas para el cálculo de las propiedades de la espuma teniendo en cuenta los contaminantes, ya que se suponía que aún con el aceite, la espuma y sus contaminantes, se comportaba como una mezcla pseudohomogénea, por lo que ahora, se plantea que al introducirse aceite de formación a la espuma, se formarán baches de aceite, que funcionarán y se moverán como tal.



CAPÍTULO VI.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

VI.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

En este capítulo, se hará una síntesis de los resultados encontrados, realizando un análisis tanto de ellos como de las posibles recomendaciones para desarrollarse en posteriores trabajos.

VI.1.- CONCLUSIONES:

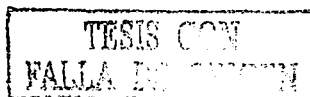
- ~ Se realizó una serie de experimentos, tendientes a observar y modelar la estabilidad de la espuma por medio de pruebas estáticas del tiempo de vida media, arrojando, una serie de ecuaciones empíricas para tal efecto.
- ~ Se recopiló la información existente para el cálculo de la densidad y la viscosidad de la espuma bajo influencia de contaminantes sólidos y líquidos.
- ~ Como se observó en el análisis de resultados, la espuma estáticamente no puede ser sometida a la contaminación con aceite, ya que es incapaz de retenerlo, así como se puede presentar contaminación con salmueras de diferentes concentraciones, pero cuidando que la cantidad contaminante de la misma sea moderada (debajo de 10 por ciento en volumen).
- ~ Se aplicó en forma aceptable, la metodología cualitativa denominada "Matriz de Vester" utilizada para planeación de proyectos en la identificación y relación existentes entre las causas y consecuencias del problema que abordó esta tesis, que era la influencia de los contaminantes sólidos y líquidos en el comportamiento de la espuma denominada (BPU)
- ~ Se recopiló y conjuntó un procedimiento teórico para la determinación de la densidad de la espuma contaminada, teniendo en cuenta la influencia de las fracciones de cada uno de los componentes presentes en la misma y las variaciones de presión y temperatura para cada una de las fracciones componentes.

VI.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- ~ Igualmente, se recopiló y conjuntó un procedimiento teórico para la determinación de la viscosidad de la espuma contaminada, teniendo en cuenta la influencia de las fracciones de cada uno de los componentes presentes en la misma y las variaciones de presión y temperatura para cada una de dichas fracciones.
- ~ Se diseñaron pruebas experimentales de laboratorio para observar el comportamiento de la estabilidad de la espuma por medio de la medición de la vida media de la espuma sometida a contaminantes líquidos, tipo salmuera y aceite diesel.
- ~ Se aplicó un modelo de análisis estadístico factorial fraccionado a dos niveles para calcular la interacción existente entre las diferentes variables independientes y la variable dependiente, así como la influencia de dichas variables interrelacionadas. Bajo este análisis, se pudo comprobar que el tiempo de vida media de la espuma, está primordialmente influenciada por el porcentaje en volumen de contaminante que entra a su composición, seguida por la concentración de (NaCl) en la salmuera, la interacción entre estas dos variables, la calidad de la espuma y la interacción entre la calidad del porcentaje en volumen de contaminación de la espuma. Las demás interrelaciones casi no tienen influencia dentro del sistema, lo cual no significa que la variable dependiente no se vea afectada por ellas. Lo que nos muestra este análisis, es que las variables independientes, se ven muy poco afectadas por las demás variables independientes.
- ~ Se desarrollaron procedimientos prácticos para la preparación de la base líquida, para la formación de la espuma, la preparación de la salmuera contaminante, la contaminación con aceite y para el proceso de recolección de datos.
- ~ Se determinó inicialmente, el tiempo de vida media promedio de la espuma limpia a una calidad de 55%, el cual dio un valor promedio de 4238 segundos.

VI.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- ~ Se encontró que la espuma tratada en la presente tesis, presenta un abatimiento casi inmediato a concentraciones de contaminantes con salmueras por encima del 10 (diez) por ciento en volumen.
- ~ Se desarrolló una relación empírica para determinar el tiempo de vida media de la espuma limpia dependiente de la calidad de la misma, esta ecuación incluye dos partes, la primera es una relación que va desde calidades superiores a 55 por ciento hasta una calidad de 80 por ciento (ecuación V.1). La segunda, es una relación para determinar el tiempo de vida media de la espuma tratada en esta tesis para los rangos superiores a 80 por ciento y hasta el 90 por ciento de calidad de la espuma. (Ecuación V.2).
- ~ Se encontró una relación empírica del tiempo de vida media cuando se tiene una influencia de contaminación con sal (NaCl) dependiente de la concentración de sal en (ppm) (partes por millón) dentro de la salmuera, esta ecuación cubre un rango de 95000 ppm hasta 160000 ppm. (ecuación V.3).
- ~ Se desarrolló una ecuación lineal para determinar el tiempo de vida media de la espuma bajo la influencia de contaminantes líquidos tipo salmuera de (NaCl), cuya dependencia está relacionada tanto a la calidad de la espuma, a la concentración de sal dentro de la salmuera y el porcentaje en volumen de contaminación de la muestra. (Ecuación V.7)
- ~ Como consecuencia de todo lo anterior, se elaboró una metodología para la estimación del tiempo de vida media de la espuma a diferentes condiciones de calidad, concentración de la salmuera y porcentaje en volumen de contaminación de la misma (anexo C)
- ~ Se observó que para la contaminación con aceite tipo Diesel, la espuma en este trabajo tratada, no logra suspender, por lo menos estáticamente cualquier cantidad de aceite agregado, por lo que se presentaba la segregación inmediata del volumen de aceite agregado.



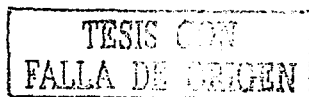
VI.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Con la anterior observación, se replanteó la metodología teórica propuesta, para considerar al aceite, como un elemento contaminante que no entra en la mezcla pseudo-homogénea de la espuma.

VI.2.- RECOMENDACIONES:

Las observaciones que a continuación se realizan, buscan aportar algunas ideas y sugerencias útiles para continuar desarrollando el tema de las espumas sometidas a la contaminación de diferente índole y son observaciones que se recogieron en el transcurso de la presente tesis.

- Tratar de realizar la experimentación con algunas salmueras de diferente composición, es decir, buscar realizar pruebas con sales diferentes al (NaCl) esto con el objeto de comparar si existe algún efecto debido a la naturaleza de la sal contaminante o si por el contrario, la espuma se comporta siguiendo el mismo patrón expuesto en estas pruebas.
- Buscar ampliar la gama de pruebas realizadas, sobre todo en el rango de 80 a 95 por ciento en calidad, esto con el objetivo de tener una mayor certeza en el modelo propuesto para dicho rango.
- Diseñar un programa de experimentación tendiente a validar o refutar o modificar los planteamientos teóricos propuestos para las propiedades físicas de densidad y viscosidad.
- Ampliar el presente trabajo, para una variedad mas amplia de composiciones de espuma, ya que en esta tesis, solo se manejó una composición promedio de la misma.



VI.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- ~ Tratar de desarrollar un aparato experimental, donde se pueda probar el comportamiento de la espuma frente a la contaminación en condiciones dinámicas.
- ~ diseñar un plan de pruebas, donde se pueda probar el comportamiento de la espuma frente a la contaminación de tipo sólido.
- ~ Una vez caracterizada y manejado el comportamiento reológico de la espuma limpia, desarrollar pruebas para observar el comportamiento de la espuma con diferentes contaminantes.
- ~ Buscar un acuerdo entre la Universidad Nacional Autónoma de México, Petróleos Mexicanos y el Instituto Mexicano del Petróleo, para el diseño y construcción o adaptación de un laboratorio, para poder desarrollar posteriores trabajos con espumas, tanto limpias como bajo la influencia de contaminantes de diferente índole.
- ~ Tratar de realizar un escalamiento de las pruebas que se han desarrollado y se desarrollen en los laboratorios experimentales, a modelos escalados de pozos petroleros, como es el caso de los pozos escuela con los que cuenta Petróleos Mexicanos, esto con el objeto de acercar cada vez mas los modelos propuestos a las condiciones reales de operación.
- ~ Tratar de validar o corregir los datos aquí propuestos y encontrados, con los datos obtenidos en las operaciones reales de la industria petrolera.
- ~ Por último, tratar de desarrollar un programa computacional capaz de modelar acertadamente las condiciones de trabajo de las espumas usadas en las diferentes regiones de PEMEX-exploración y Producción, tanto en forma limpia, como bajo la influencia de cualquier tipo de contaminante encontrado.

BIBLIOGRAFÍA.

BIBLIOGRAFÍA.

BIBLIOGRAFÍA

BIBLIOGRAFÍA

Berkman, S. y Egloff, G. (1941). ***"Emulsions And Foams."*** Chicago, Illinois: Reinhold Publishing Corporation.

Beyer A. H., Millhone R.S., Foote R. W., (1972). ***"Flow Behavior of foam as a well circulating fluid"***, Artículo SPE – 3986. Presentado en la 47th Annual Meeting of the SPE/AIME, San Antonio, Texas, Oct 8 – 11 de 1972.

Bieseman, T. And Emeh, V., (1995). ***"An Introduction to Underbalanced Drilling"***, 1st International Underbalanced Drilling Conference, The Hague, Netherlands, October.

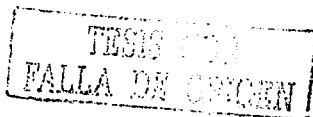
Blackwell B. F., Sobolik K. B., (1987) ***"An Experimental Investigation of Pressure Drop of Aqueous Foam in Laminar Tube Flow"***, Sandia National Laboratories, Albuquerque; New Mexico, Abril de 1987.

Bonilla, L.F. y Shah, S. N. (2000) ***"Experimental Investigation On The Rheology Of Foams."*** Artículo SPE 59752 presentado en la SPE/CERI Gas Technology Symposium. Calgary, Alberta, Canadá del 3-5 de Abril de 2000.

Bourgoyne Jr. Adam T., Millheim Keith K., Chenevert Martin E. Young Jr. F. S., (1991) ***"Applied drilling engineering"***, SPE textbook series, Vol. 2, SPE, Richardson, Texas, 1991.

Devereux, S. (1998). ***"Practical Well Planning And Drilling Manual."*** Tulsa, Oklahoma: PennWell.

Gas Research Institute. (1997). ***"Underbalanced Drilling Manual."*** Chicago, Illinois. Gas Research Institute.



BIBLIOGRAFÍA

Govier G. W., Aziz K., (1972) **"The Flow of Complex Mixtures in Pipes"**, Van Nostrand Reinhold Company, New York, 1972.

Guo B., Ghalambor A., **"Gas Volume Requirements for Underbalanced Drilling, Deviated Holes"**, Pennwell corporation, E.U.A. 2002.

Harris P.C., (1985) **"Effects of Texture on Rheology of Foam Fracturing Fluids"**, Artículo SPE – 14257, presentado en la 60th SPE annual technical conference and exhibition, Las Vegas Nevada, 22 - 25 de septiembre de 1985.

Herzhaft B., Toure A., Bruni F., Saintpere S., (2000) **"Aqueous Foams for Underbalanced Drilling: The Question of Solids"**, Artículo SPE – 62898, presentado en la SPE annual technical conference and exhibition, Dallas Texas, 1 - 4 de Octubre del 2000.

Kitsios, E. Kamphuis, H. Quaresma, V. (1994) **"Underbalanced Drilling Through Oil Production Zones With Stable Foam In Oman"** Artículo IADC/SPE 27525 Presentado en la IADC/SPE Drilling Conference, Dallas Texas, E.U. del 15-18 de Febrero de 1994.

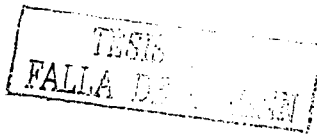
Liu Gefei, Medley G. H. (1996). **"Foam Computer model helps in analysis of underbalanced drilling"**, Artículo en Oil and Gas Journal, Julio 1 de 1996, pp 114 – 119.

Lyons W. C., Guo B., Seidel F. A., **"Air and Gas Drilling Manual"**, McGraw – Hill Companies, E.U.A. 2001.

Martins, A.L. Lourenço, A.M.F. Sá, C.H.M. Silva Jr. V., Petrobras, (2001): **"Foam Rheology Characterization as a Tool for Predicting Pressures While Drilling Offshore Wells in UBD Conditions"**, Artículo SPE/IADC- 67691. Presentado en la SPE/IADC Drilling Conference, Amsterdam. The Netherlands 2001.

Maurer Engineering Inc. (1998). **"Underbalanced Drilling And Completion Manual."** Houston, Texas. Maurer Engineering Inc.

Camilo E. Libreros M.



BIBLIOGRAFÍA

McCain Jr. William D., (1990) **"The Properties of Petroleum Fluids, Second Edition"**, Pennwell Publishing Company, Tulsa Oklahoma. 1990).

Meng Y.F., Lou P.Y., Jiao D., Lao R. K., (1996) **"Horizontal Drilling Technology with Cycling Using of Inert Foam"**, Artículo SPE – 37078, presentado en la SPE International Conference on Horizontal Well Technology, Calgary Canada, 18 - 20 de Noviembre de 1996.

Mitchell B. J. (1971) **"Test Data fill Theory gap on Using Foam as a Drilling Fluid"** Artículo de la revista Oil and Gas Journal, Septiembre 6, 1971.

Montgomery D. C., Runger G. C., **"Probabilidad y Estadística Aplicadas a la Ingeniería"**, McGraw – Hill Interamericana Editores, México 1997.

Nakagawa E.Y., Lourenço A.M.F., Andrade Jr. P.H., Silva Jr. V., Silva P.R.C., Martins A.L., (2002) **"Evaluation of solid carrying Capacity in Aerated Fluid Drilling: Real Scale Tests and Modeling"**, Artículo IADC/SPE – 74464, presentado en la IADC/SPE drilling conference, en Dallas, Texas, del 26 – 28 de Febrero del 2002.

Nas. S., (1999) **"Underbalance Drilling in a Depleted Gasfield Onshore UK with coiled Tubing and Stable Foam"**, Artículo SPE/IADC – 52826, presentado en la SPE/IADC Drilling conference, Amsterdam, Holland, 9 - 11 de Marzo del 1999.

Negrão A.F. Lage A.C.V.M. (1997) **"An Overview Of Air/Gas/Foam Drilling in Brazil"** Artículo SPE/IADC 37678 Presentado en la SPE/IADC Drilling conference, Amsterdam. The Netherlands 1997.

Prud'homme R, Khan S., **"Foams: Theory, Measurements, and applications"**, Surfactant Science Series, E.U.A. (1996).

BIBLIOGRAFÍA

Rivera B., Chaparro O., Duarte O., (1998) **"Gestión de Proyectos de Investigación Agropecuaria"**, Universidad de Caldas, Manizales, Caldas, 1998.

Rojas. Y., Kakadjian S., Aponte A., Marquez R., Sanchez G., (2001) **"Stability and Rheological Behavior of Aqueous Foams for Underbalanced Drilling"**, Artículo SPE 64999 Presentado en la SPE International Symposium on Oilfield Chemistry, Houston, Texas, Febrero 13 – 16 del 2001.

Silva Jr. V., Shayegi S., Nakagawa E. Y., (2000) **"System for the Hydraulics Analysis of Underbalanced Drilling Projects in Offshore and Onshore Scenarios"**, Artículo SPE 58972 Presentado en la SPE International Petroleum Conference and Exhibition in México, Villahermosa, Tabasco, Febrero 1 – 3 del 2000.

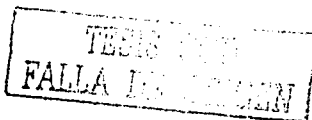
Svorstól I., Vassenden F., Mannhardt K., (1996) **"Laboratory Studies for Design of a Foam Pilot in the Snorre Field"**, Artículo SPE/DOE – 35400, presentado en la SPE/DOE Tenth symposium on improved recovery, Tulsa Oklahoma, 21 - 24 de Abril de 1996.

Swokowski Earl W., **"Cálculo con Geometría Analítica, 2^{da} edición"**, Grupo Editorial Iberoamérica, México 1989.

Tena Suck, E. A. y Turnbull Plaza, B. (2001). **"Manual De Investigación Experimental, Elaboración De Tesis."** México, D.F. Plaza y Valdés.

Unidad de perforación y Mantenimiento de Pozos PEMEX. (2000) **"Un Siglo De La Perforación En México."** México, D.F.: PEP.

Vieira P., Miska S. Reed T. Kuru E., **"Minimum Air and Water Flow Rates Required for Effective Cuttings Transport in High Angle and Horizontal Wells"**, Artículo SPE/IADC 74463 Presentado en la SPE/IADC Drilling conference, Dallas, Texas, 26 – 28 Febrero de 2002.



A N E X O S

PAGINACIÓN DISCONTINUA

ANEXOS.

ANEXOS.

ANEXO A.

Para el flujo en el interior de la tubería de perforación, la fracción másica de gas está definida como:

$$W_g = \frac{m_g}{m_g + m_l} \quad \text{Ec.- (A-1)}$$

donde:

m_g y m_l , es el gasto másico de gas y líquido, respectivamente.

Entonces, el volumen específico de la mezcla de espuma puede ser expresado como:

$$V = W_g V_g + (1 - W_g) V_l \quad \text{Ec.- (A-2)}$$

donde:

V , volumen específico de la espuma.

V_g , V_l , volumen específico del gas y del líquido, respectivamente.

De ahí, que combinando las ecuaciones A-1 y A-2, llegamos a la ecuación de estado para flujo en el interior de la tubería:

$$V = \frac{a}{P} + b \quad \text{Ec.- (A-3)}$$

Los coeficientes a , b están definidos en la Tabla No. A.1.

P = Presión Absoluta del sistema (psia).

Para flujo ascendente en el espacio anular, la espuma es mezclada con recortes de formación. Presentándose así tres fases en la mezcla, por lo que las fracciones de masa de los tres componentes son:

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

ANEXOS.

$$\begin{aligned} W_g &= \frac{m_g}{m_g + m_l + m_s} \\ W_l &= \frac{m_l}{m_g + m_l + m_s} \\ W_s &= \frac{m_s}{m_g + m_l + m_s} \end{aligned}$$

Ec.- (A-4)

donde:

m_s , es el gasto másico de los recortes.

El volumen específico de la mezcla espuma / recortes puede ser expresado como:

$$V = W_g V_g + W_l V_l + W_s V_s$$

Ec.- (A-5)

Combinando las ecuaciones (A-4) y (A-5) tendremos la ecuación de estado para flujo de espumas en el espacio anular.

$$V = \frac{a}{P} + b$$

Ec.- (A-6)

Las funciones de la ecuación diferencial de balance de energía mecánica en el interior de la tubería de perforación y en el espacio anular son:

$$F_p(MD, VD, P) = \frac{S_p P^3 + \frac{2fabc^2}{25.8} P^2 + \frac{f}{25.8} a^2 c^2 P}{bP^3 + aP^2 - abc^2 P - a^2 c^2} \times \frac{1}{D}$$

Ec.- (A-7)

Donde:

$$S_p = \frac{f}{25.8} b^2 c^2 - D \frac{d(VD)}{d(MD)}$$

Ec.- (A-8)

ANEXOS.

Donde:

- D** = Diámetro Interior de la sarta, (in).
MD = Profundidad Medida, (Ft).
P = Presión Absoluta (Psia).
VD = Profundidad Vertical, (Ft).
D_h = Diámetro de hueco abierto, (in).
D_p = Diámetro Exterior de la tubería de perforación, (in).

$$F_A(MD, VD, P) = \frac{S_A P^3 + \frac{2f \cdot abc^2}{21.1} P^2 + \frac{f}{21.1} a^2 c^2 P}{bP^3 + aP^2 - abc^2 P - a^2 c^2} \times \frac{1}{D_h - D_p}$$

Ec.- (A-9)

Donde:

$$S_A = \frac{f}{21.1} b^2 c^2 - (D_h - D_p) \frac{d(VD)}{d(MD)}$$

Ec.- (A-10)

Coefficientes	Interior de tubería	Anular	A través de barrena (c')
a	$\frac{W_g ZRT}{M_g}$	$\frac{W_g ZRT}{M_g}$	N/A
b	$(1 - W_g) V_l$	$W_l V_l + W_s V_s$	N/A
c ó c'	$\frac{4}{\pi D^2} (m_g + m_l)$	$\frac{4}{\pi (D_h^2 - D_p^2)} (m_g + m_l + m_s)$	$\frac{m_g + m_l}{A_p}$

Tabla A-1. Coeficientes de las Ecuaciones de Estado para las Espumas

ANEXO B.

A continuación se relacionan todas las tablas, cálculos y gráficas desarrolladas durante la recolección y análisis de los datos.

1.- Concentración de salmuera de 95000 ppm para diferentes calidades (Promedios).

Tabla B-1: Calidad de 55% con salmuera de 95000 ppm

Calidad	55%	V_{líquido}:	360	ml		
V_{espuma}:	800 ml	V_{espumante}:	5.4	ml		
% espuma	% Sal	V_{espuma}	V_{Sal}	V_{rompe}	Vida media	
% Vol.	% Vol.	ml	ml	ml	horas	seg.
100	0	100	0	22.50	1:12:52	4372
98	2	98	2	22.05	1:00:25	3625
96	4	96	4	21.60	0:49:58	2998
94	6	94	6	21.15	0:37:17	2237
92	8	92	8	20.70	0:27:53	1673
90	10	90	10	20.25	0:19:57	1197
85	15	42.5	7.5	9.56	0:04:38	278
80	20	40	10	9.00	0:00:36	36
75	25	37.5	12.5	8.44	0:00:33	33
70	30	35	15	7.88	0:00:23	23

Tabla B-2: Calidad de 60% con salmuera de 95000 ppm

Calidad	60%	V_{líquido}:	320	ml		
V_{espuma}:	800 ml	V_{espumante}:	4.8	ml		
% espuma	% Sal	V_{espuma}	V_{Sal}	V_{rompe}	Vida media	
% Vol.	% Vol.	ml	ml	ml	horas	seg.
100	0	100	0	20.00	1:28:30	5310
98	2	98	2	19.60	1:15:44	4544
96	4	96	4	19.20	1:02:04	3724
94	6	94	6	18.80	0:47:53	2873
92	8	92	8	18.40	0:34:43	2083
90	10	90	10	18.00	0:20:36	1236
85	15	42.5	7.5	8.50	0:04:59	299
80	20	40	10	8.00	0:00:35	35
75	25	37.5	12.5	7.50	0:00:34	34
70	30	35	15	7.00	0:00:16	16

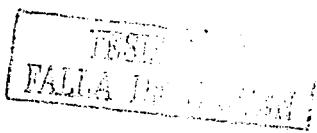


Tabla B-3: Calidad de 70% con salmuera de 95000 ppm

Calidad	70%	V_{liquido}	240	ml		
V_{espuma}	800 ml	V_{espumante}	3.6	ml		
% espuma	% Sal	V_{espuma}	V_{Sal}	V_{rompe}	Vida media	
% Vol.	% Vol.	ml	ml	ml	horas	seg.
100	0	100	0	15.00	1:47:32	6442
98	2	98	2	14.70	1:30:57	5457
96	4	96	4	14.40	1:14:14	4454
94	6	94	6	14.10	0:53:35	3215
92	8	92	8	13.80	0:37:57	2277
90	10	90	10	13.50	0:20:03	1203
85	15	42.5	7.5	6.38	0:05:58	358
80	20	40	10	6.00	0:01:30	90
75	25	37.5	12.5	5.63	0:00:56	56
70	30	35	15	5.25	0:00:20	20

Tabla B-4: Calidad de 80% con salmuera de 95000 ppm

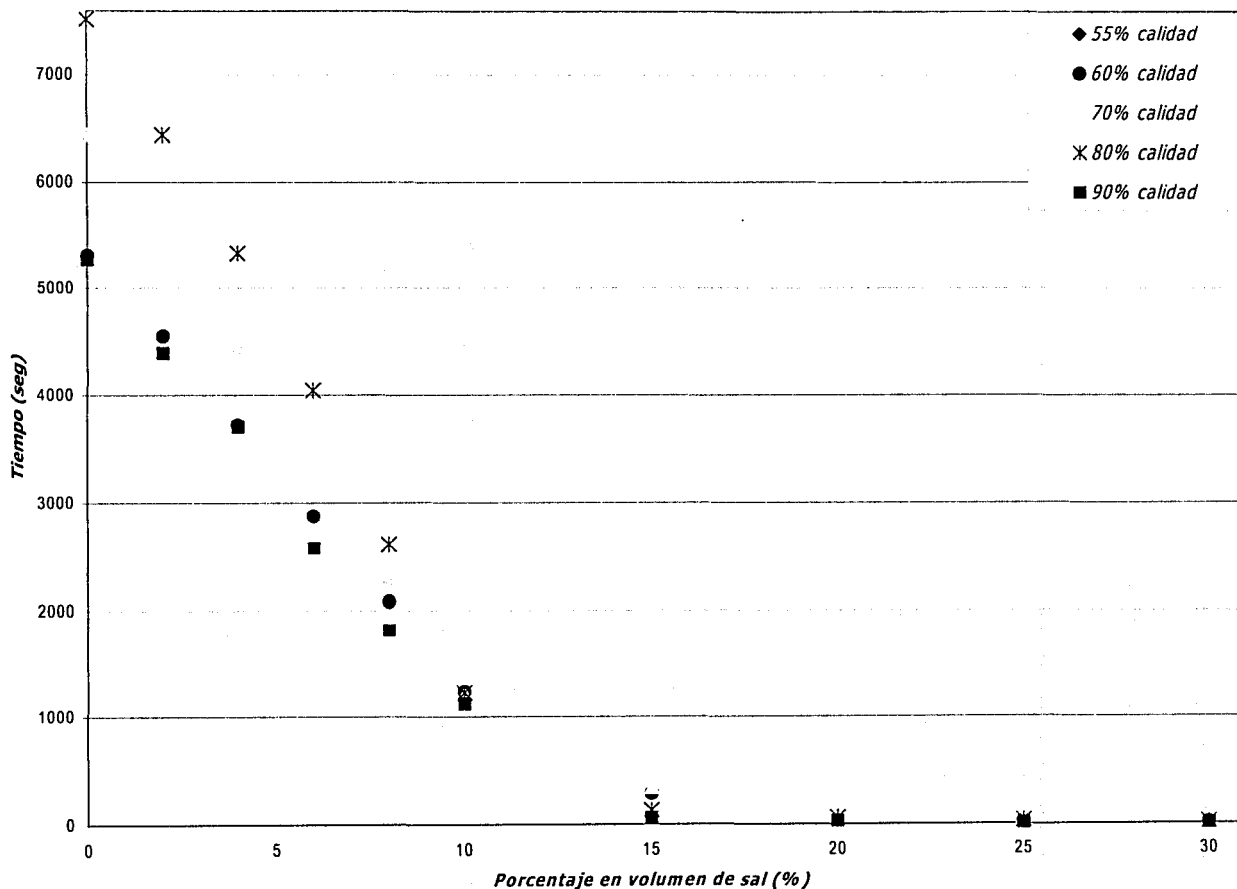
Calidad	80%	V_{liquido}	160	ml		
V_{espuma}	800 ml	V_{espumante}	2.4	ml		
% espuma	% Sal	V_{espuma}	V_{Sal}	V_{rompe}	Vida media	
% Vol.	% Vol.	ml	ml	ml	horas	seg.
100	0	100	0	10.00	2:05:20	7520
98	2	98	2	9.80	1:47:19	6439
96	4	96	4	9.60	1:28:48	5328
94	6	94	6	9.40	1:07:23	4043
92	8	92	8	9.20	0:43:32	2612
90	10	90	10	9.00	0:20:24	1224
85	15	42.5	7.5	4.25	0:02:19	139
80	20	40	10	4.00	0:01:03	63
75	25	37.5	12.5	3.75	0:00:41	41
70	30	35	15	3.50	0:00:19	19

Tabla B-5: Calidad de 90% con salmuera de 95000 ppm

Calidad	90%	V_{liquido}:	80	ml		
V_{espuma}:	800 ml	V_{espumante}:	1.2	ml		
% espuma	% Sal	V espuma	V Sal	V rompe	Vida media	
% Vol.	% Vol.	ml	ml	ml	horas	seg.
100	0	100	0	5.00	1:27:53	5273
98	2	98	2	4.90	1:13:09	4389
96	4	96	4	4.80	1:01:49	3709
94	6	94	6	4.70	0:42:59	2579
92	8	92	8	4.60	0:30:21	1821
90	10	90	10	4.50	0:18:42	1122
85	15	85	15	4.25	0:01:07	67
80	20	40	10	2.00	0:00:31	31
75	25	37.5	12.5	1.88	0:00:18	18
70	30	35	15	1.75	0:00:10	10

Gráfica B-1: Tiempo de Vida Media de la espuma vs. Porcentaje en volumen de contaminación con salmuera para una concentración de sal en la salmuera de 95000 ppm (partes por millón) de NaCl y todas las calidades iniciales probadas (Datos Completos).

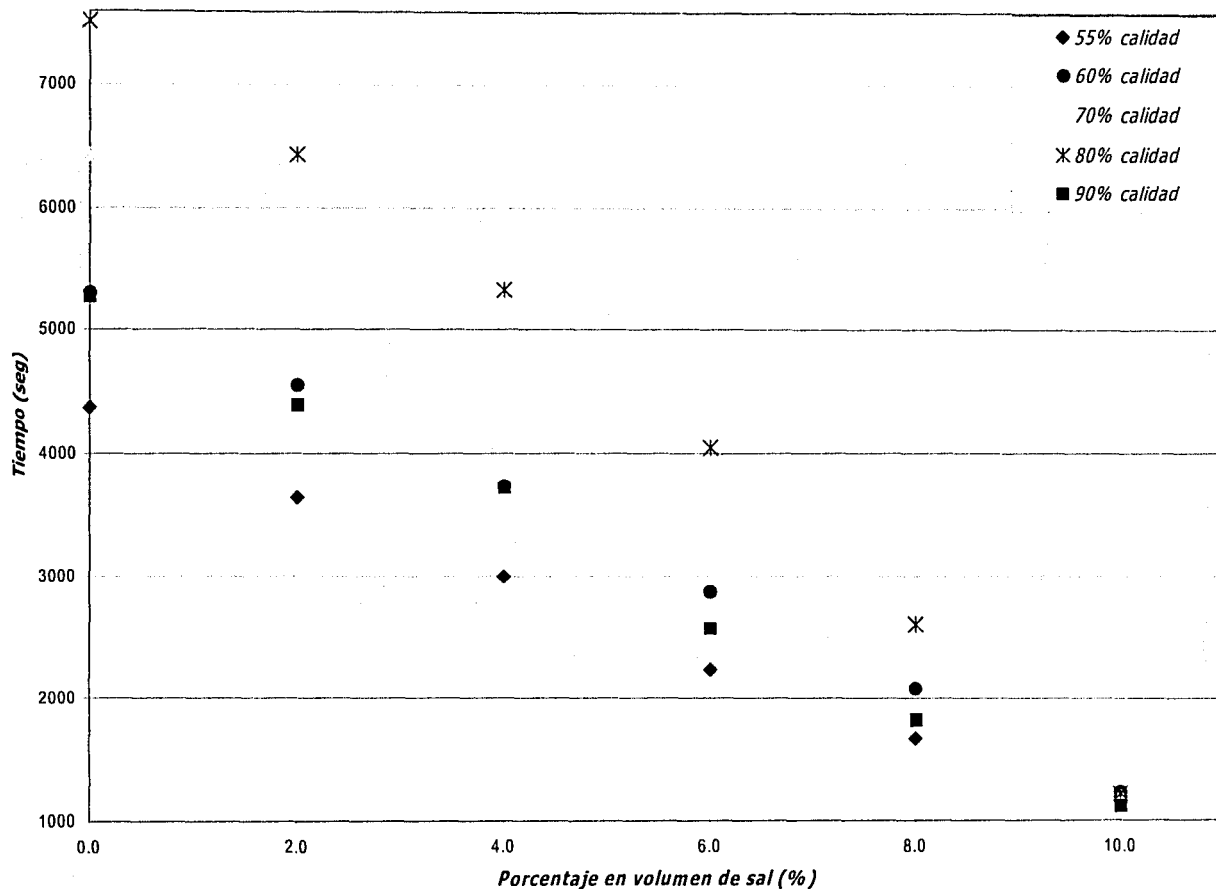
Tiempo de Vida Media vs porcentaje en volumen de contaminación con salmuera de 95000 ppm de concentración, para todas las calidades iniciales probadas.



TERCER AÑO
FALTA DE ENTRENAMIENTO

Gráfica B-2 Tiempo de Vida Media de la espuma vs. Porcentaje en volumen de contaminación con salmuera para una concentración de sal en la salmuera de 95000 ppm (partes por millón) de NaCl y todas la calidades iniciales probadas (Datos hasta 10% en volumen de salmuera)

Tiempo de Vida Media vs porcentaje en volumen de contaminación con salmuera de 95000 ppm de concentración, para todas las calidades iniciales probadas.



TESIS CON
FALTA DE CONTENIDO

2.- Concentración de salmuera de 130000 ppm para diferentes calidades (Promedios).**Tabla B-6:** Calidad de 55% con salmuera de 130000 ppm

Calidad	55%	V_{líquido}:	360	ml		
V_{espuma}:	800 ml	V_{espumante}:	5.4	ml		
% espuma	% Sal	V_{espuma}	V_{Sal}	V_{rompe}	Vida media	
% Vol.	% Vol.	ml	ml	ml	horas	seg.
100	0	50	0	11.25	1:09:34	4174
98	2	49	1	11.03	0:56:56	3416
96	4	48	2	10.80	0:43:47	2627
94	6	47	3	10.58	0:33:07	1987
92	8	46	4	10.35	0:22:03	1323
90	10	45	5	10.13	0:11:54	714
85	15	42.5	7.5	9.56	0:02:05	125
80	20	40	10	9.00	0:01:06	66
75	25	37.5	12.5	8.44	0:00:35	35
70	30	35	15	7.88	0:00:02	2

Tabla B-7: Calidad de 60% con salmuera de 130000 ppm

Calidad	60%	V_{líquido}:	320	ml		
V_{espuma}:	800 ml	V_{espumante}:	4.8	ml		
% espuma	% Sal	V_{espuma}	V_{Sal}	V_{rompe}	Vida media	
% Vol.	% Vol.	ml	ml	ml	horas	seg.
100	0	50	0	10.00	1:27:52	5272
98	2	49	1	9.80	1:11:52	4312
96	4	48	2	9.60	0:55:41	3341
94	6	47	3	9.40	0:43:20	2600
92	8	46	4	9.20	0:29:59	1799
90	10	45	5	9.00	0:13:00	780
85	15	42.5	7.5	8.50	0:02:20	140
80	20	40	10	8.00	0:00:44	44
75	25	37.5	12.5	7.50	0:00:07	7
70	30	35	15	7.00	0:00:03	3

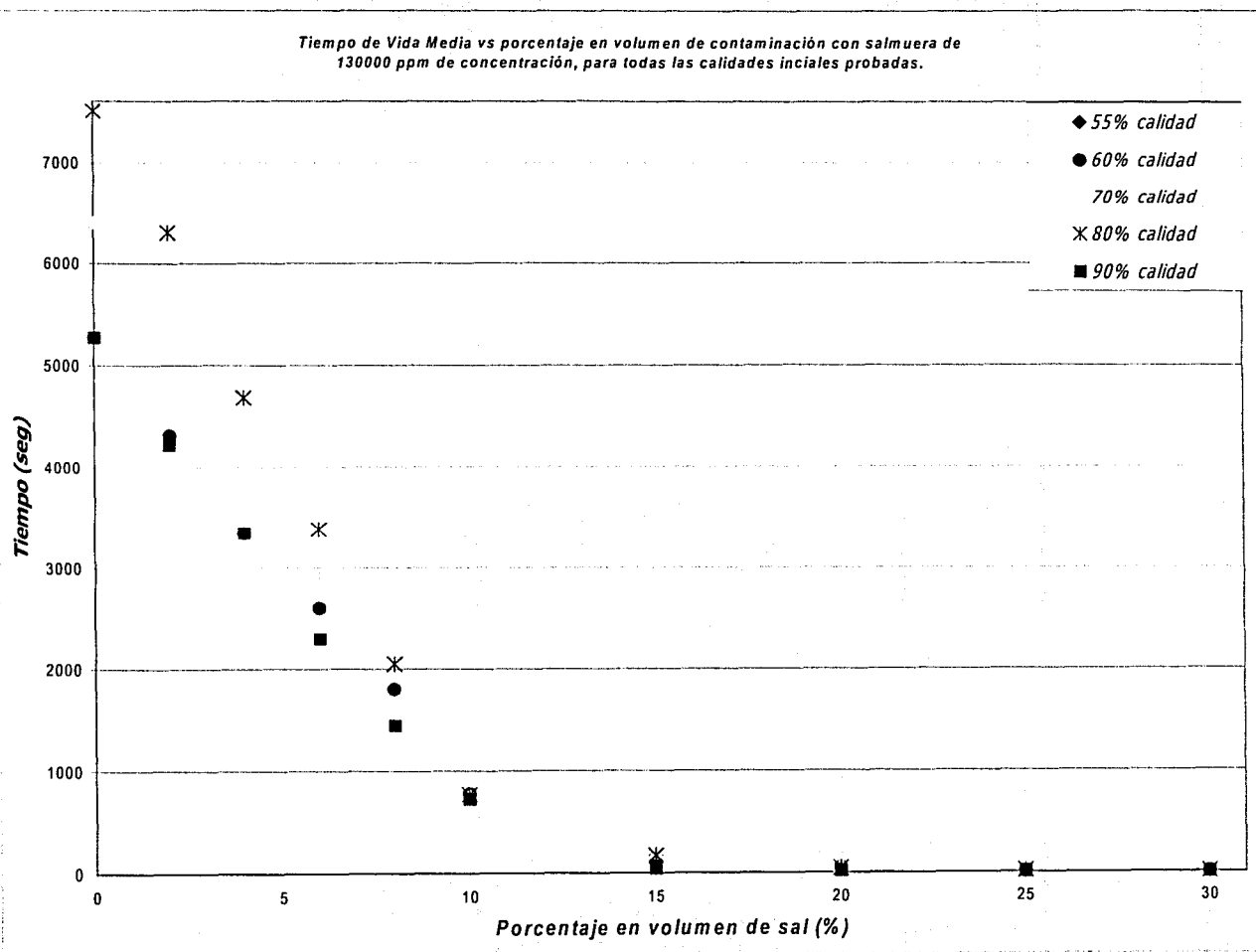
Tabla B-8: Calidad de 70% con salmuera de 130000 ppm

Calidad	70%	V_{liquido}: 240	ml			
Vespuma:	800 ml	Vespumante:	3.6	ml		
% espuma	% Sal	Vespuma	V Sal	V rompe	Vida media	
% Vol.	% Vol.	ml	ml	ml	horas	seg.
100	0	50	0	7.50	1:46:36	6396
98	2	49	1	7.35	1:28:10	5290
96	4	48	2	7.20	1:08:15	4095
94	6	47	3	7.05	0:48:47	2927
92	8	46	4	6.90	0:32:23	1943
90	10	45	5	6.75	0:12:37	757
85	15	42.5	7.5	6.38	0:03:17	197
80	20	40	10	6.00	0:01:02	62
75	25	37.5	12.5	5.63	0:00:44	44
70	30	35	15	5.25	0:00:12	12

Tabla B-9: Calidad de 80% con salmuera de 130000 ppm

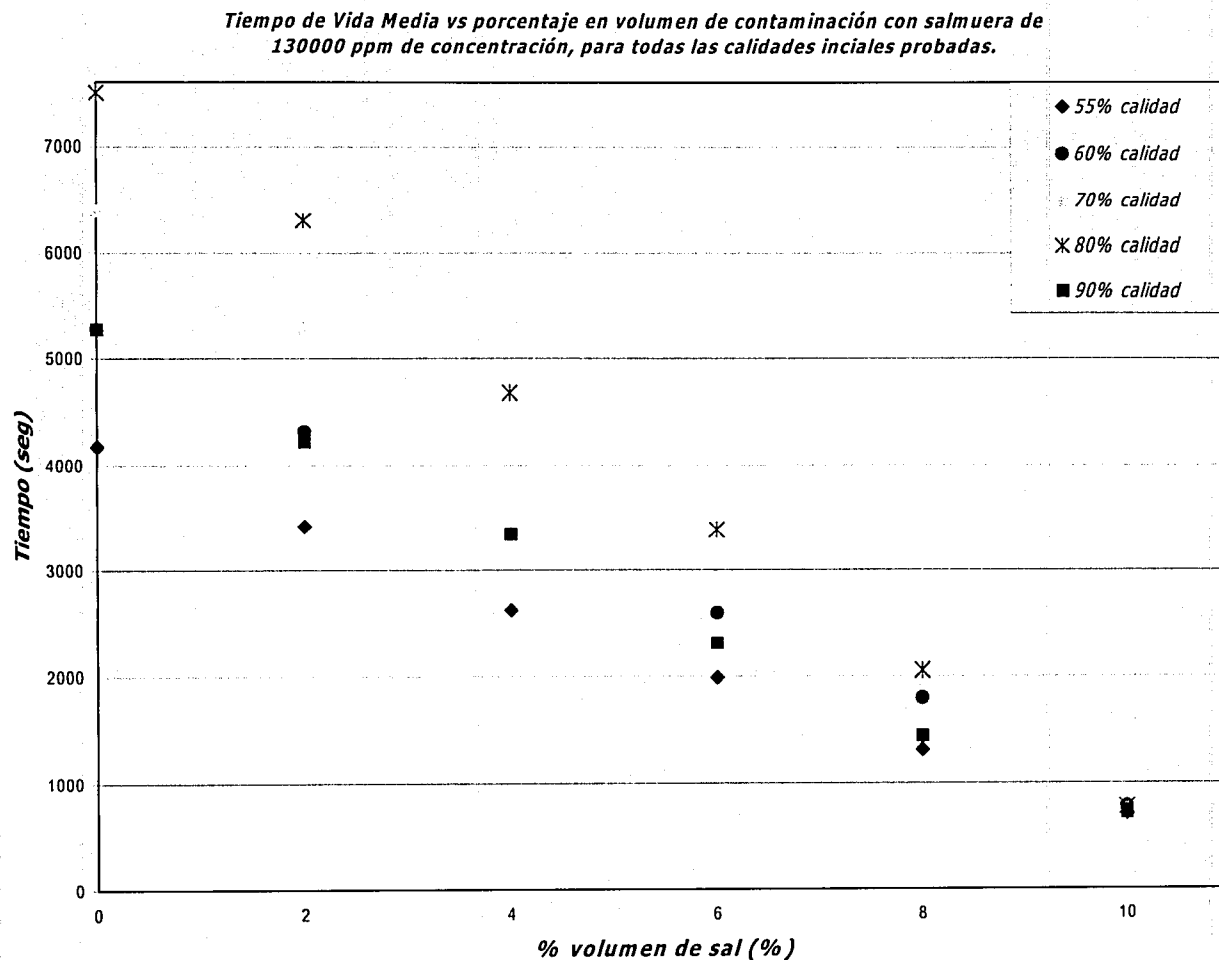
Calidad	80%	V_{liquido}: 160	ml			
Vespuma:	800 ml	Vespumante:	2.4	ml		
% espuma	% Sal	Vespuma	V Sal	V rompe	Vida media	
% Vol.	% Vol.	ml	ml	ml	horas	seg.
100	0	50	0	5.00	2:05:04	7504
98	2	98	2	9.80	1:44:55	6295
96	4	96	4	9.60	1:17:56	4676
94	6	94	6	9.40	0:56:21	3381
92	8	92	8	9.20	0:34:10	2050
90	10	45	5	4.50	0:12:53	773
85	15	42.5	7.5	4.25	0:02:43	163
80	20	40	10	4.00	0:00:41	41
75	25	37.5	12.5	3.75	0:00:15	15
70	30	35	15	3.50	0:00:02	2

Gráfica B-3: Tiempo de Vida Media de la espuma vs. Porcentaje en volumen de contaminación con salmuera para una concentración de sal en la salmuera de 130000 ppm (partes por millón) de NaCl y todas las calidades iniciales probadas (Datos Completos).



TESIS CON
 FALTA DE ORIGEN

Gráfica B-4 Tiempo de Vida Media de la espuma vs. Porcentaje en volumen de contaminación con salmuera para una concentración de sal en la salmuera de 130000 ppm (partes por millón) de NaCl y todas las calidades iniciales probadas (Datos hasta 10% en volumen de salmuera)



TESIS CON
FALTA DE CONTENIDO

3.- Concentración de salmuera de 160000 ppm para diferentes calidades (Promedios).**Tabla B-11:** Calidad de 55% con salmuera de 160000 ppm

Calidad	55%	V_{liquido}:	360	ml		
V_{espuma}:	800 ml	V_{espumante}:	5.4	ml		
% espuma	% Sal	V espuma	V Sal	V rompe	Vida media	
% Vol.	% Vol.	ml	ml	ml	horas	seg.
100	0	100	0	22.50	1:09:28	4168
98	2	98	2	22.05	0:56:00	3360
96	4	96	4	21.60	0:41:12	2472
94	6	94	6	21.15	0:30:15	1815
92	8	92	8	20.70	0:18:57	1137
90	10	90	10	20.25	0:06:28	388
85	15	42.5	7.5	9.56	0:04:14	254
80	20	40	10	9.00	0:01:15	75
75	25	37.5	12.5	8.44	0:00:38	38
70	30	35	15	7.88	0:00:04	4

Tabla B-12: Calidad de 60% con salmuera de 160000 ppm

Calidad	60%	V_{liquido}:	320	ml		
V_{espuma}:	800 ml	V_{espumante}:	4.8	ml		
% espuma	% Sal	V espuma	V Sal	V rompe	Vida media	
% Vol.	% Vol.	ml	ml	ml	horas	seg.
100	0	100	0	20.00	1:27:09	5229
98	2	98	2	19.60	1:11:14	4274
96	4	96	4	19.20	0:51:41	3101
94	6	94	6	18.80	0:36:28	2188
92	8	92	8	18.40	0:21:52	1312
90	10	90	10	18.00	0:06:29	389
85	15	42.5	7.5	8.50	0:03:12	192
80	20	40	10	8.00	0:00:24	24
75	25	37.5	12.5	7.50	0:00:23	23
70	30	35	15	7.00	0:00:12	12

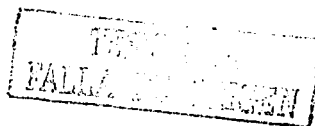


Tabla B-13: Calidad de 70% con salmuera de 160000 ppm

Calidad	70%	V_{liquido}:	240	ml		
V_{espuma}:	800 ml	V_{espumante}:	3.6	ml		
% espuma	% Sal	V_{espuma}	V_{Sal}	V_{rompe}	Vida media	
% Vol.	% Vol.	ml	ml	ml	horas	seg.
100	0	100	0	15.00	1:45:53	6353
98	2	98	2	14.70	1:23:20	5000
96	4	96	4	14.40	1:00:38	3638
94	6	94	6	14.10	0:43:59	2639
92	8	92	8	13.80	0:25:42	1542
90	10	90	10	13.50	0:06:31	391
85	15	42.5	7.5	6.38	0:01:27	87
80	20	40	10	6.00	0:00:23	23
75	25	37.5	12.5	5.63	0:00:19	19
70	30	35	15	5.25	0:00:12	12

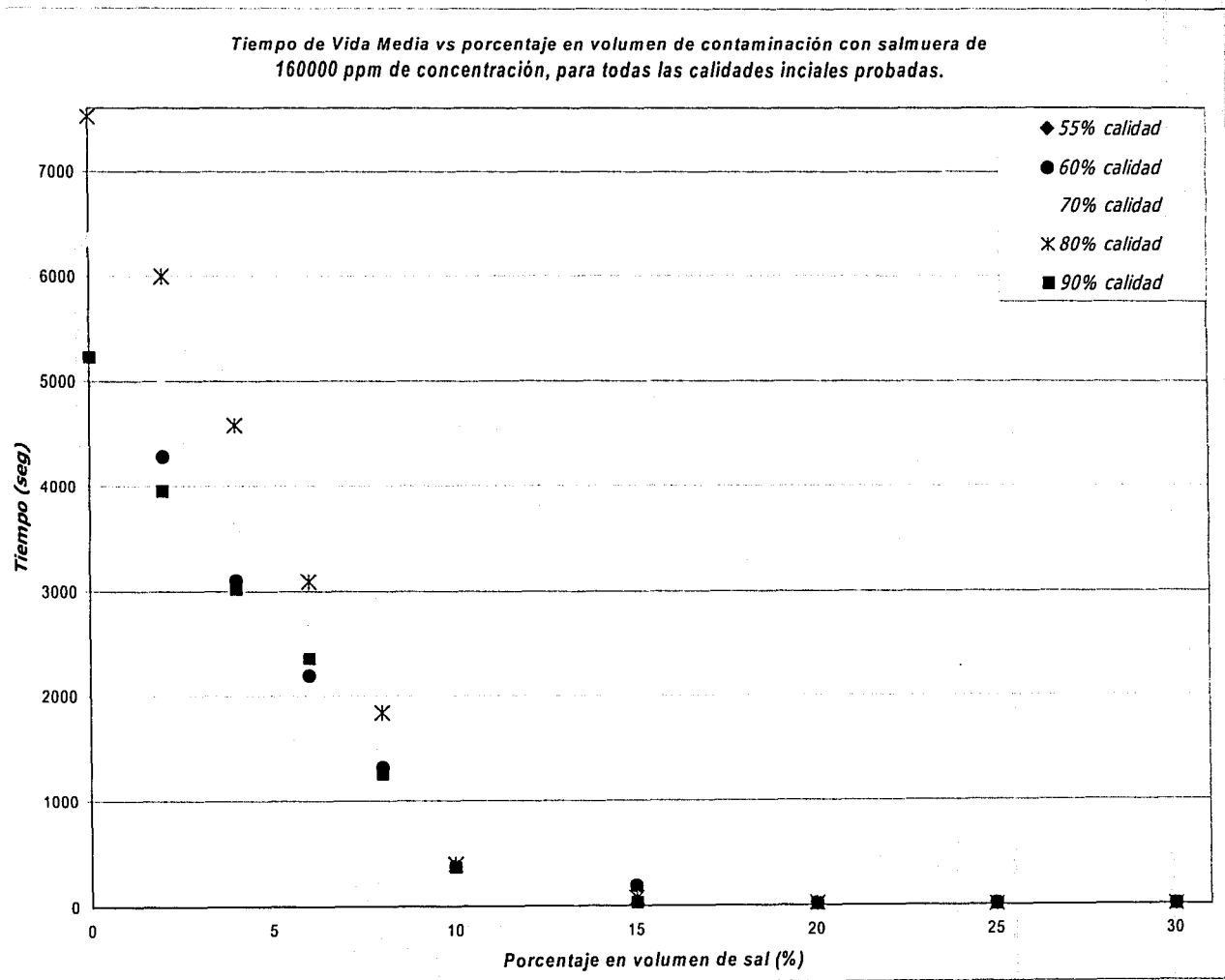
Tabla B-14: Calidad de 80% con salmuera de 160000 ppm

Calidad	80%	V_{liquido}:	160	ml		
V_{espuma}:	800 ml	V_{espumante}:	2.4	ml		
% espuma	% Sal	V_{espuma}	V_{Sal}	V_{rompe}	Vida media	
% Vol.	% Vol.	ml	ml	ml	horas	seg.
100	0	100	0	10.00	2:05:18	7518
98	2	98	2	9.80	1:39:59	5999
96	4	96	4	9.60	1:16:12	4572
94	6	94	6	9.40	0:51:30	3090
92	8	92	8	9.20	0:30:37	1837
90	10	90	10	9.00	0:06:46	406
85	15	42.5	7.5	4.25	0:01:19	79
80	20	40	10	4.00	0:00:22	22
75	25	37.5	12.5	3.75	0:00:08	8
70	30	35	15	3.50	0:00:02	2

Tabla B-15: Calidad de 90% con salmuera de 160000 ppm

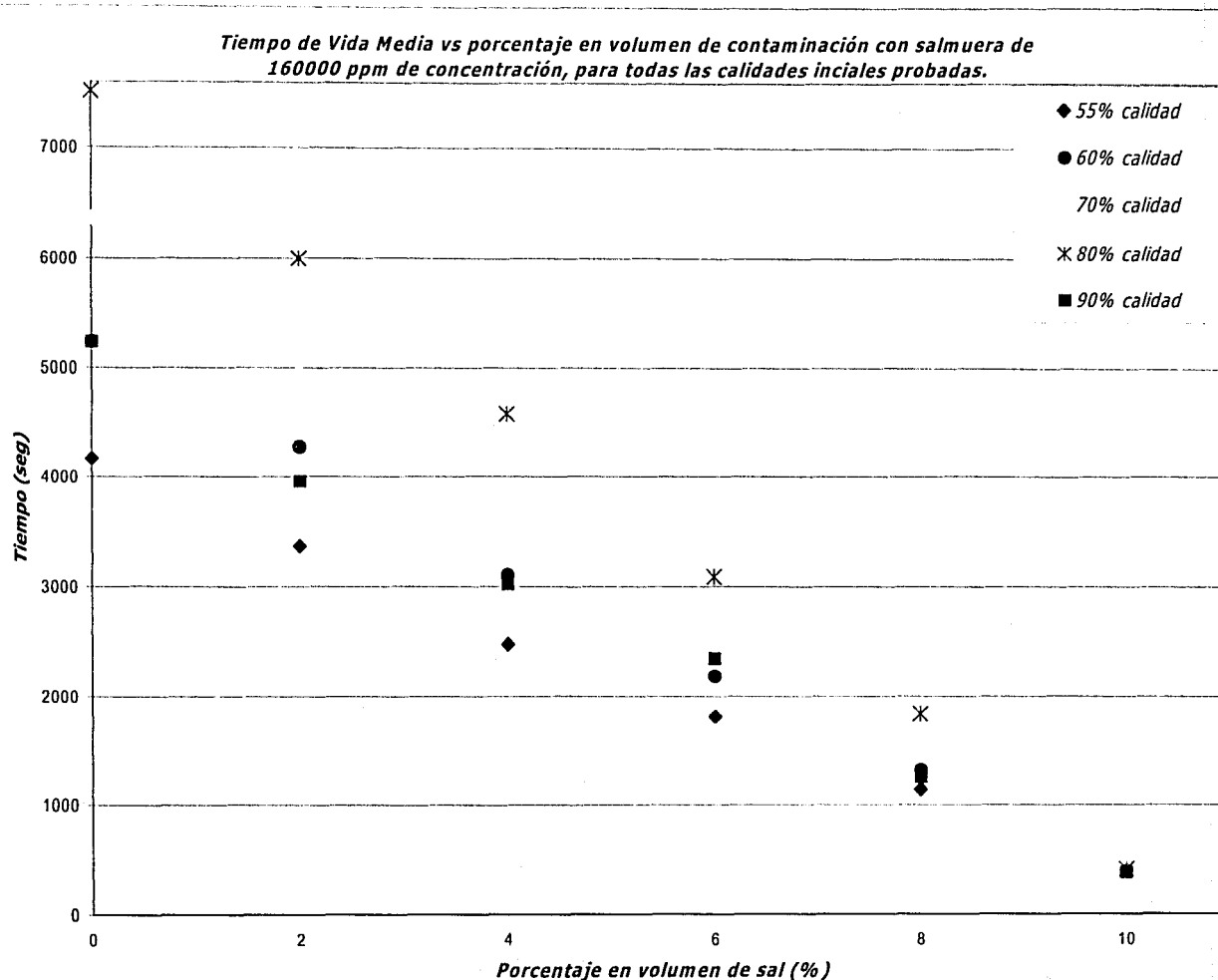
Calidad 90%		V _{líquido} : 80 ml		V _{espumante} : 1.2 ml		
V _{espuma} : % espuma	% Sal	V _{espuma}	V _{Sal}	V _{rompe}	Vida media	
% Vol.	% Vol.	ml	ml	ml	horas	seg.
100	0	100	0	5.00	1:27:10	5230
98	2	98	2	4.90	1:05:57	3957
96	4	96	4	4.80	0:50:24	3024
94	6	94	6	4.70	0:39:14	2354
92	8	92	8	4.60	0:20:54	1254
90	10	90	10	4.50	0:06:16	376
85	15	85	15	4.25	0:00:33	33
80	20	40	10	2.00	0:00:10	10
75	25	37.5	12.5	1.88	0:00:08	8
70	30	35	15	1.75	0:00:03	3

Gráfica B-5: Tiempo de Vida Media de la espuma vs. Porcentaje en volumen de contaminación con salmuera para una concentración de sal en la salmuera de 160000 ppm (partes por millón) de NaCl y todas las calidades iniciales probadas (Datos Completos).



TESIS CON
FALTA DE CUBRIR

Gráfica B-6 Tiempo de Vida Media de la espuma a diferentes calidades vs. Porcentaje en volumen de contaminación con salmuera para una concentración de sal en la salmuera de 160000 ppm (partes por millón) de NaCl y todas las calidades iniciales probadas (Datos hasta 10% en volumen).



TESIS CON
FALTA DE ORIGEN

4.- Manejo de datos para la calidad de 55% con diferentes salmueras y porcentajes en volumen de contaminación.

Tabla B-16: Manejo de datos para espuma con calidad de 55% y salmuera de 95000 (ppm) de concentración.

% espuma % Vol.	% Sal % Vol.	Vol. espuma ml	Vol. Sal ml	Vol. rompe ml	Vida media		delta	% tiempo	% variación
					horas	seg.	seg.	%	%
100	0	100	0	22.50	1:12:52	4372	0	100.00	0.00
98	2	98	2	22.05	1:00:25	3625	747	82.91	17.09
96	4	96	4	21.60	0:49:58	2998	1374	68.57	31.43
94	6	94	6	21.15	0:37:17	2237	2135	51.17	48.83
92	8	92	8	20.70	0:27:53	1673	2699	38.27	61.73
90	10	90	10	20.25	0:19:57	1197	3175	27.38	72.62
85	15	42.5	7.5	9.56	0:04:38	278	4094	6.36	93.64
80	20	40	10	9.00	0:00:36	36	4336	0.82	99.18
75	25	37.5	12.5	8.44	0:00:33	33	4339	0.75	99.25
70	30	35	15	7.88	0:00:23	23	4349	0.53	99.47

Tabla B-17: Manejo de datos para espuma con calidad de 55% y salmuera de 130000 (ppm) de concentración.

% espuma % Vol.	% Sal % Vol.	Vol. espuma ml	Vol. Sal ml	Vol. rompe ml	Vida media		delta	% tiempo	% variación
					horas	seg.	seg.	%	%
100	0	50	0	11.25	1:09:34	4174	0	100.00	0.00
98	2	49	1	11.03	0:56:56	3416	758	81.84	18.16
96	4	48	2	10.80	0:43:47	2627	1547	62.94	37.06
94	6	47	3	10.58	0:33:07	1987	2187	47.60	52.40
92	8	46	4	10.35	0:22:03	1323	2851	31.70	68.30
90	10	45	5	10.13	0:11:54	714	3460	17.11	82.89
85	15	42.5	7.5	9.56	0:02:05	125	4049	2.99	97.01
80	20	40	10	9.00	0:01:06	66	4108	1.58	98.42
75	25	37.5	12.5	8.44	0:00:35	35	4139	0.84	99.16
70	30	35	15	7.88	0:00:02	2	4172	0.05	99.95

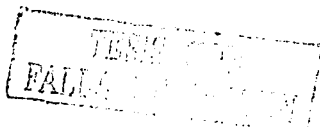
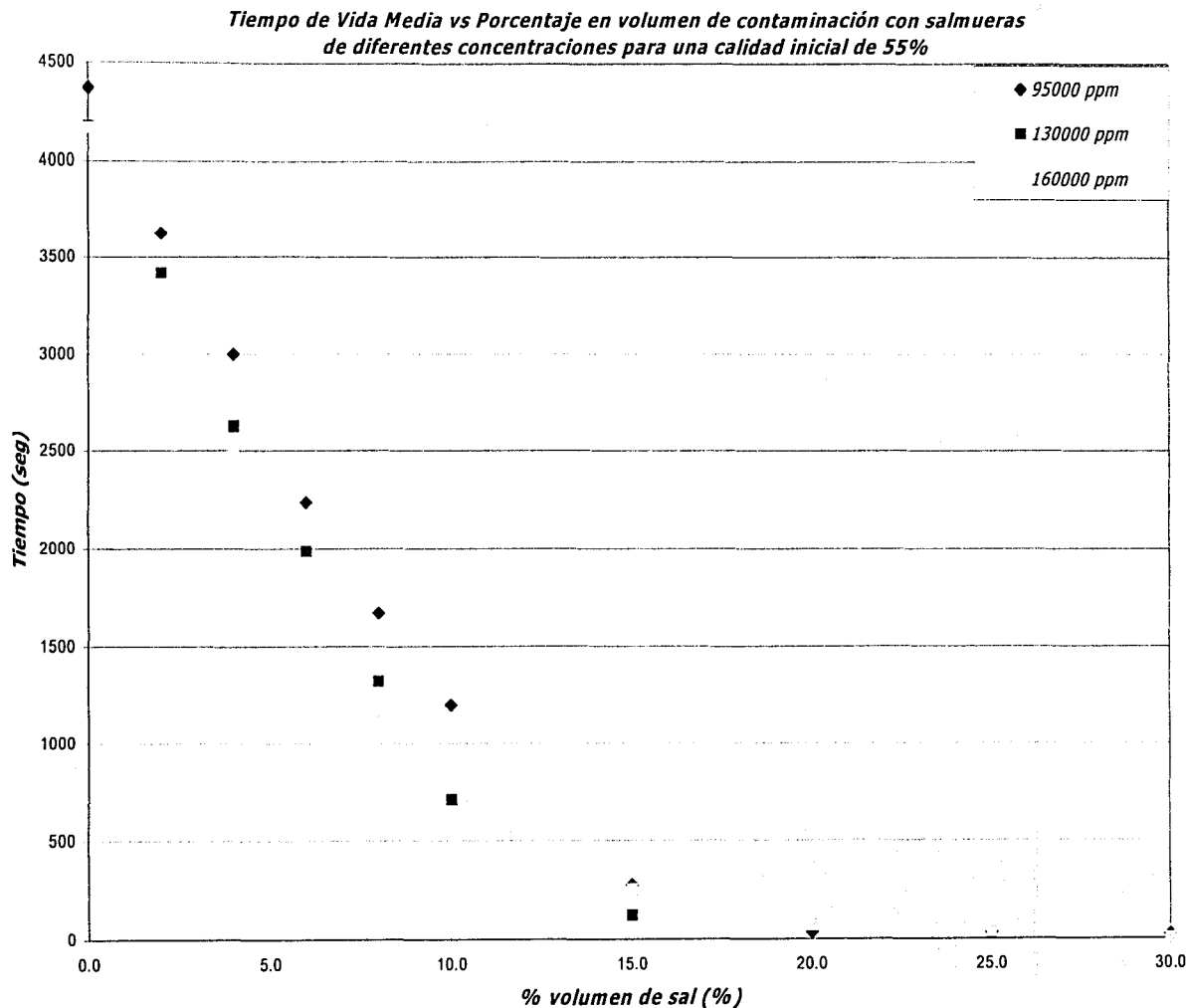


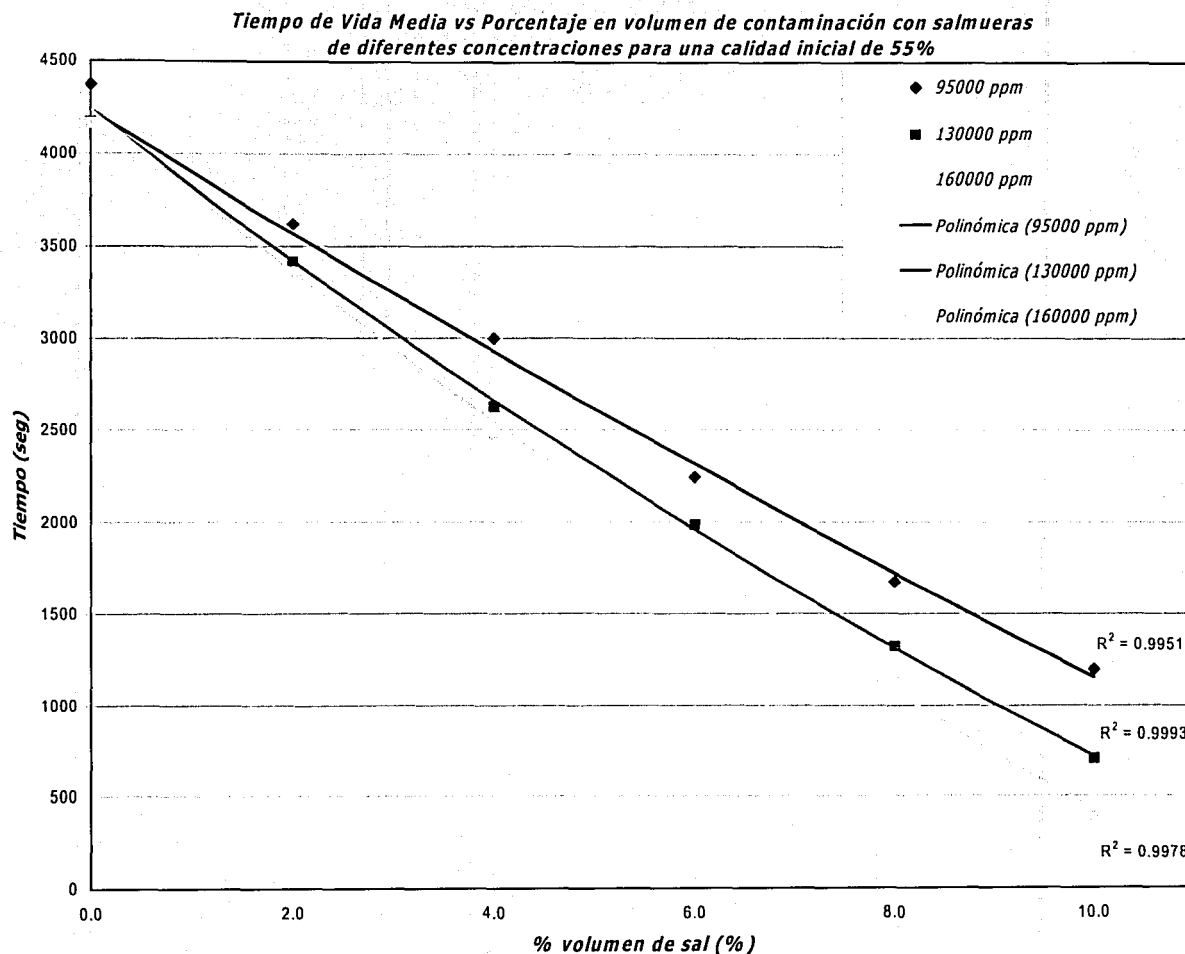
Tabla B-18: Manejo de datos para espuma con calidad de 55% y salmuera de 160000 (ppm) de concentración.

% espuma % Vol	% Sal % Vol	Vol. espuma ml	Vol. Sal ml	Vol. rompe ml	Vida media		delta	% tiempo %	% variación %
					horas	seg.	seg.		
100	0	100	0	22.50	1:09:28	4168	0	100.00	0.00
98	2	98	2	22.05	0:56:00	3360	808	80.61	19.39
96	4	96	4	21.60	0:41:12	2472	1696	59.31	40.69
94	6	94	6	21.15	0:30:15	1815	2353	43.55	56.45
92	8	92	8	20.70	0:18:57	1137	3031	27.28	72.72
90	10	90	10	20.25	0:06:28	388	3780	9.31	90.69
85	15	42.5	7.5	9.56	0:04:14	254	3914	6.09	93.91
80	20	40	10	9.00	0:01:15	75	4093	1.80	98.20
75	25	37.5	12.5	8.44	0:00:38	38	4130	0.91	99.09
70	30	35	15	7.88	0:00:04	4	4164	0.10	99.90

Gráfica B-7: Tiempo de Vida Media de la espuma de calidad inicial de 55% vs. Porcentaje en volumen de contaminación con salmuera para todas las concentraciones de sal (NaCl) en la salmuera (Datos Completos).

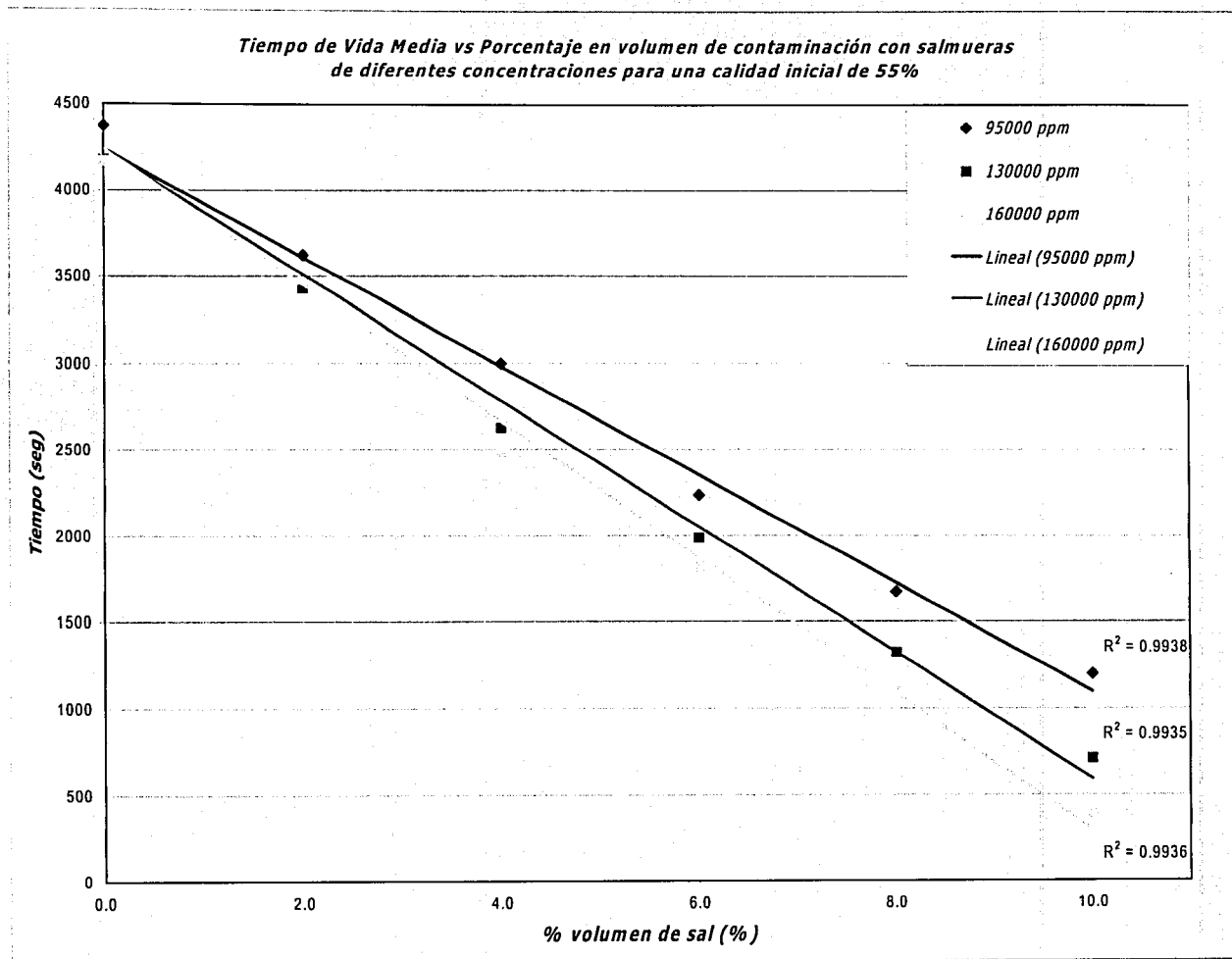


Gráfica B-8 Tiempo de Vida Media de la espuma de calidad inicial de 55% vs. Porcentaje en volumen de contaminación con salmuera para varias concentraciones de sal (NaCl) en la salmuera (Datos hasta 10% en volumen) (tendencia polinomial).



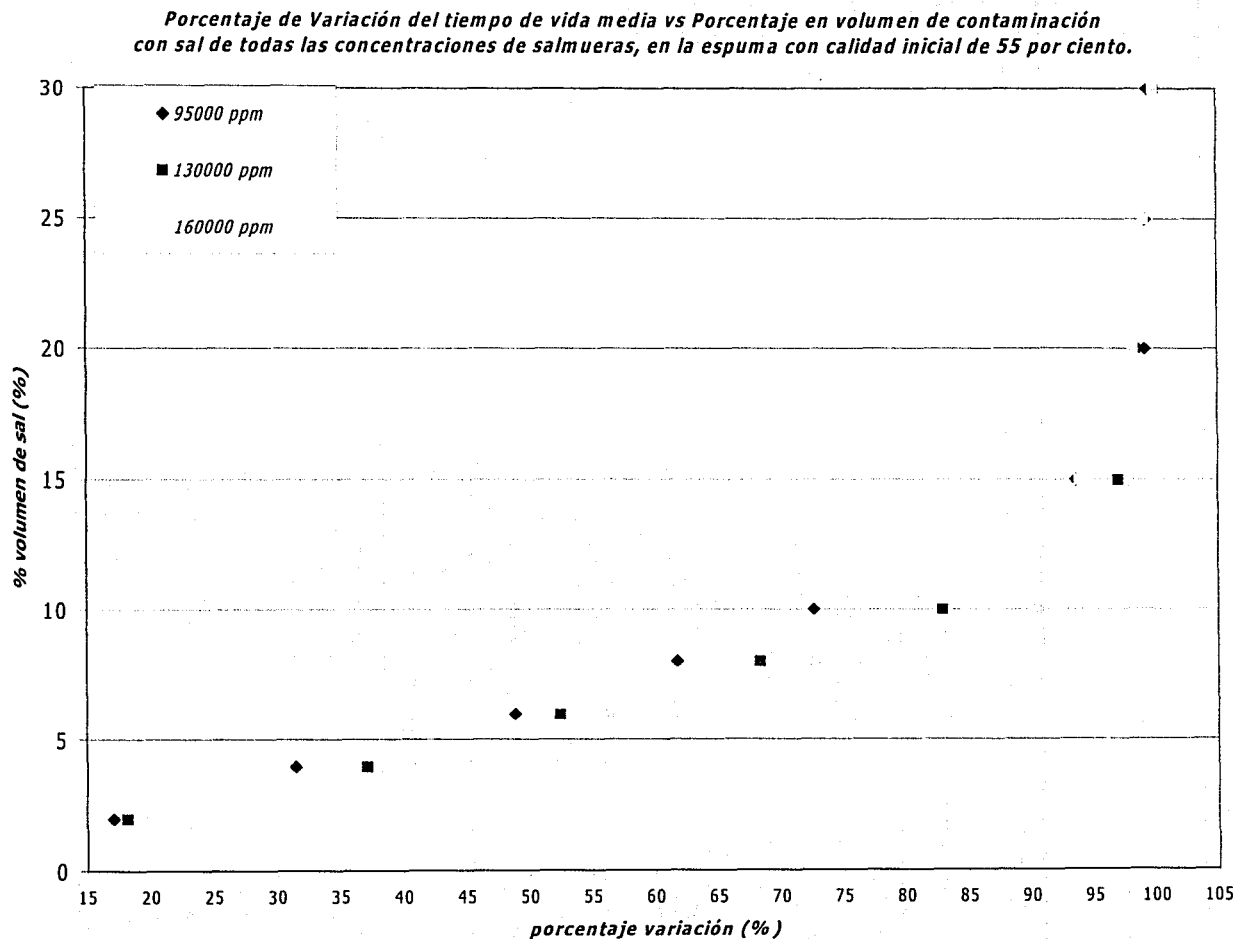
TESIS
FALTA DE ORIGEN

Gráfica B-9 Tiempo de Vida Media de la espuma de calidad inicial de 55% vs. Porcentaje en volumen de contaminación con salmuera para varias concentraciones de sal (NaCl) en la salmuera (Datos hasta 10% en volumen) (tendencia Lineal).



TESIS C-1
FALTA DE ORIGEN

Gráfica B-10 Porcentaje en volumen de contaminación con salmueras de diferentes concentraciones vs. Porcentaje de variación del tiempo de vida media de la espuma para una calidad inicial de 55% (todos los Datos).



TRM 777
FALLA EN CONTROL

5.- Manejo de datos para la calidad de 60% con diferentes salmueras y porcentajes en volumen de contaminación.

Tabla B-19: Manejo de datos para espuma con calidad de 60% y salmuera de 95000 (ppm) de concentración.

% espuma	% Sal	Vol. espuma	Vol. Sal	Vol. rompe	Vida media		delta	% tiempo	% variación
% Vol	% Vol	ml	ml	ml	horas	seg.	seg.	%	%
100	0	100	0	20.00	1:28:30	5310	0	100.00	0.00
98	2	98	2	19.60	1:15:44	4544	766	85.57	14.43
96	4	96	4	19.20	1:02:04	3724	1586	70.13	29.87
94	6	94	6	18.80	0:47:53	2873	2437	54.11	45.89
92	8	92	8	18.40	0:34:43	2083	3227	39.23	60.77
90	10	90	10	18.00	0:20:36	1236	4074	23.28	76.72
85	15	42.5	7.5	8.50	0:04:59	299	5011	5.63	94.37
80	20	40	10	8.00	0:00:35	35	5275	0.66	99.34
75	25	37.5	12.5	7.50	0:00:34	34	5276	0.64	99.36
70	30	35	15	7.00	0:00:16	16	5294	0.30	99.70

Tabla B-20: Manejo de datos para espuma con calidad de 60% y salmuera de 130000 (ppm) de concentración.

% espuma	% Sal	Vol. espuma	Vol. Sal	Vol. rompe	Vida media		delta	% tiempo	% variación
% Vol	% Vol	ml	ml	ml	horas	seg.	seg.	%	%
100	0	50	0	10.00	1:27:52	5272	0	100.00	0.00
98	2	49	1	9.80	1:11:52	4312	960	81.79	18.21
96	4	48	2	9.60	0:55:41	3341	1931	63.37	36.63
94	6	47	3	9.40	0:43:20	2600	2672	49.32	50.68
92	8	46	4	9.20	0:29:59	1799	3473	34.12	65.88
90	10	45	5	9.00	0:13:00	780	4492	14.80	85.20
85	15	42.5	7.5	8.50	0:02:20	140	5132	2.66	97.34
80	20	40	10	8.00	0:00:44	44	5228	0.83	99.17
75	25	37.5	12.5	7.50	0:00:07	7	5265	0.13	99.87
70	30	35	15	7.00	0:00:03	3	5269	0.06	99.94

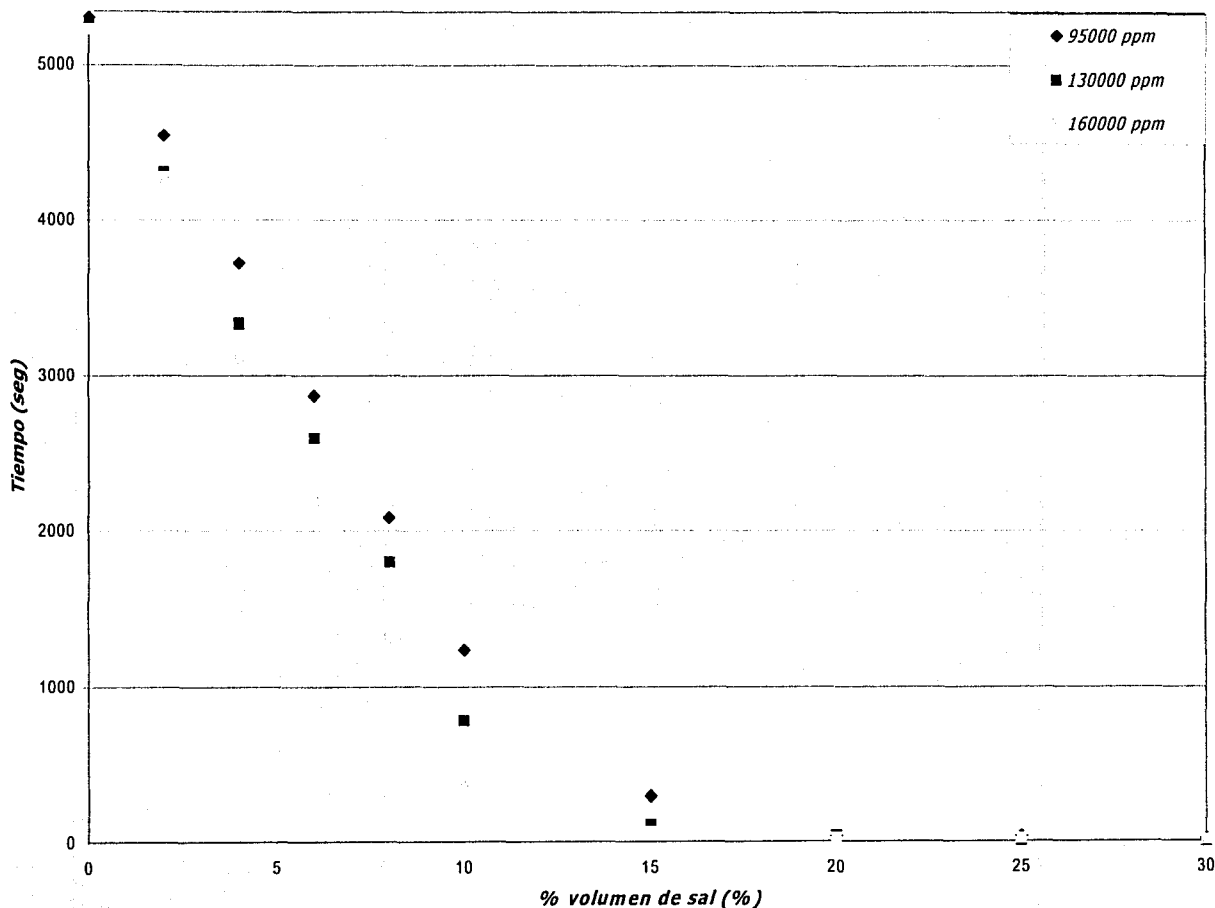
ANEXOS.

Tabla B-21: Manejo de datos para espuma con calidad de 60% y salmuera de 160000 (ppm) de concentración.

% espuma	% Sal	Vol. espuma	Vol. Sal	Vol. rompe	Vida media		delta	% tiempo	% variación
% Vol	% Vol	ml	ml	ml	horas	seg.	seg.	%	%
100	0	100	0	20.00	1:27:21	5229	0	100.00	0.00
98	2	98	2	19.60	1:11:14	4274	955	81.74	18.26
96	4	96	4	19.20	0:51:41	3101	2128	59.30	40.70
94	6	94	6	18.80	0:36:28	2188	3041	41.84	58.16
92	8	92	8	18.40	0:21:52	1312	3917	25.09	74.91
90	10	90	10	18.00	0:06:29	389	4840	7.44	92.56
85	15	42.5	7.5	8.50	0:03:12	192	5037	3.67	96.33
80	20	40	10	8.00	0:00:24	24	5205	0.46	99.54
75	25	37.5	12.5	7.50	0:00:23	23	5206	0.44	99.56
70	30	35	15	7.00	0:00:12	12	5217	0.23	99.77

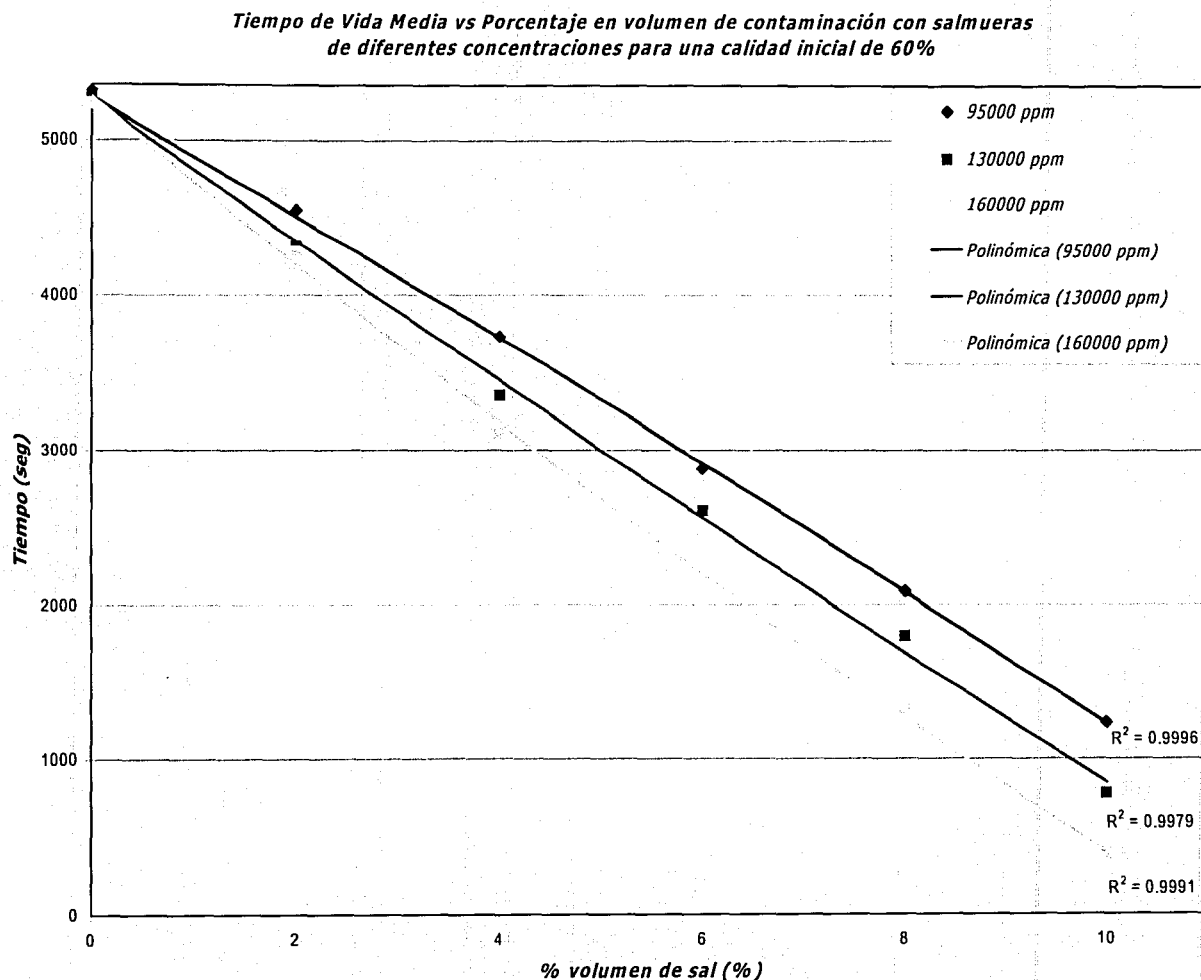
Gráfica B-11: Tiempo de Vida Media de la espuma de calidad inicial de 60% vs. Porcentaje en volumen de contaminación con salmuera para todas las concentraciones de sal (NaCl) en la salmuera (Datos Completos).

Tiempo de Vida Media vs Porcentaje en volumen de contaminación con salmuera de diferentes concentraciones para una calidad inicial de 60%



TESIS CON
FALTA DE ORIGEN

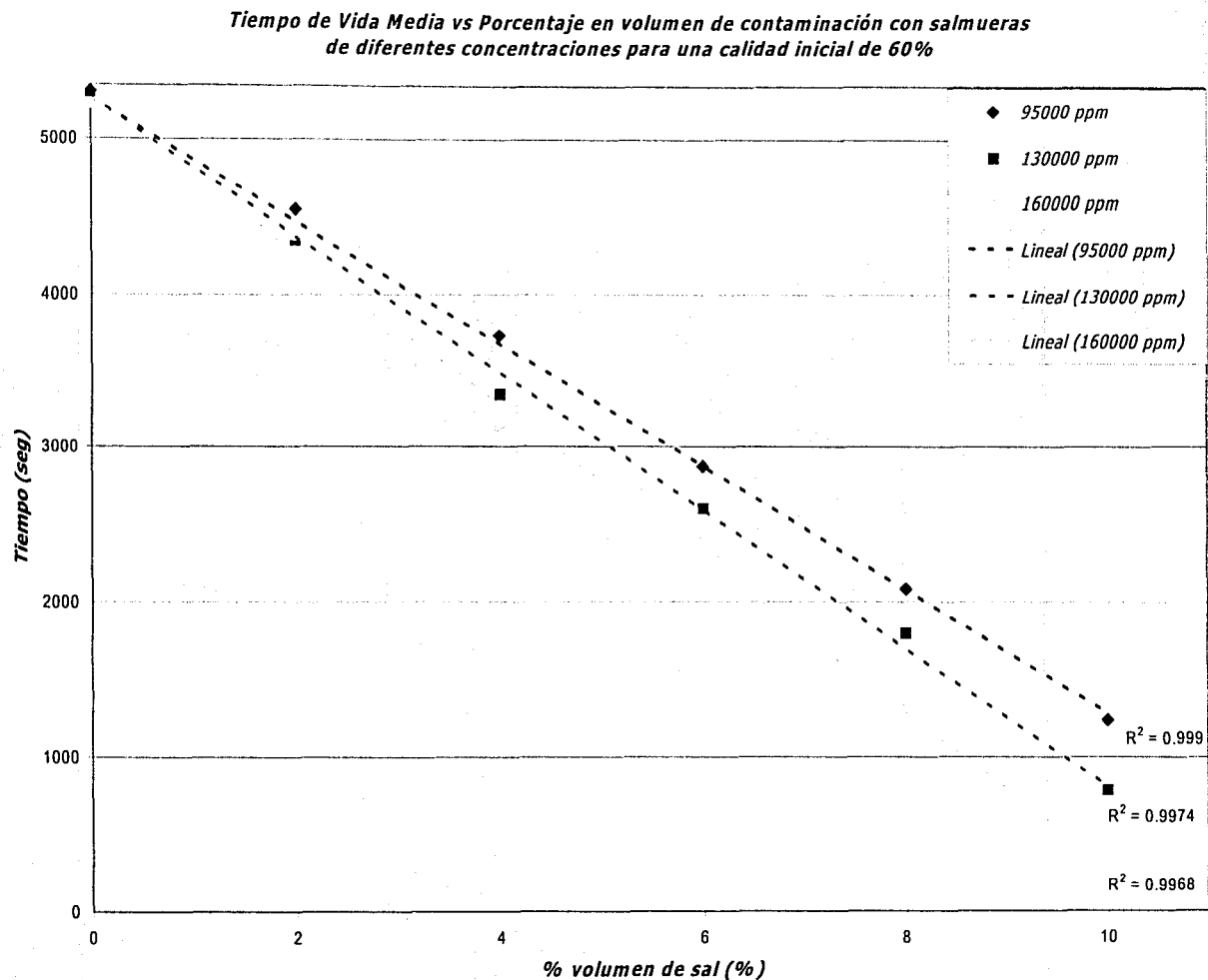
Gráfica B-12 Tiempo de Vida Media de la espuma de calidad inicial de 60% vs. Porcentaje en volumen de contaminación con salmuera para varias concentraciones de sal (NaCl) en la salmuera (Datos hasta 10% en volumen) (tendencia polinomial).



TESIS CON

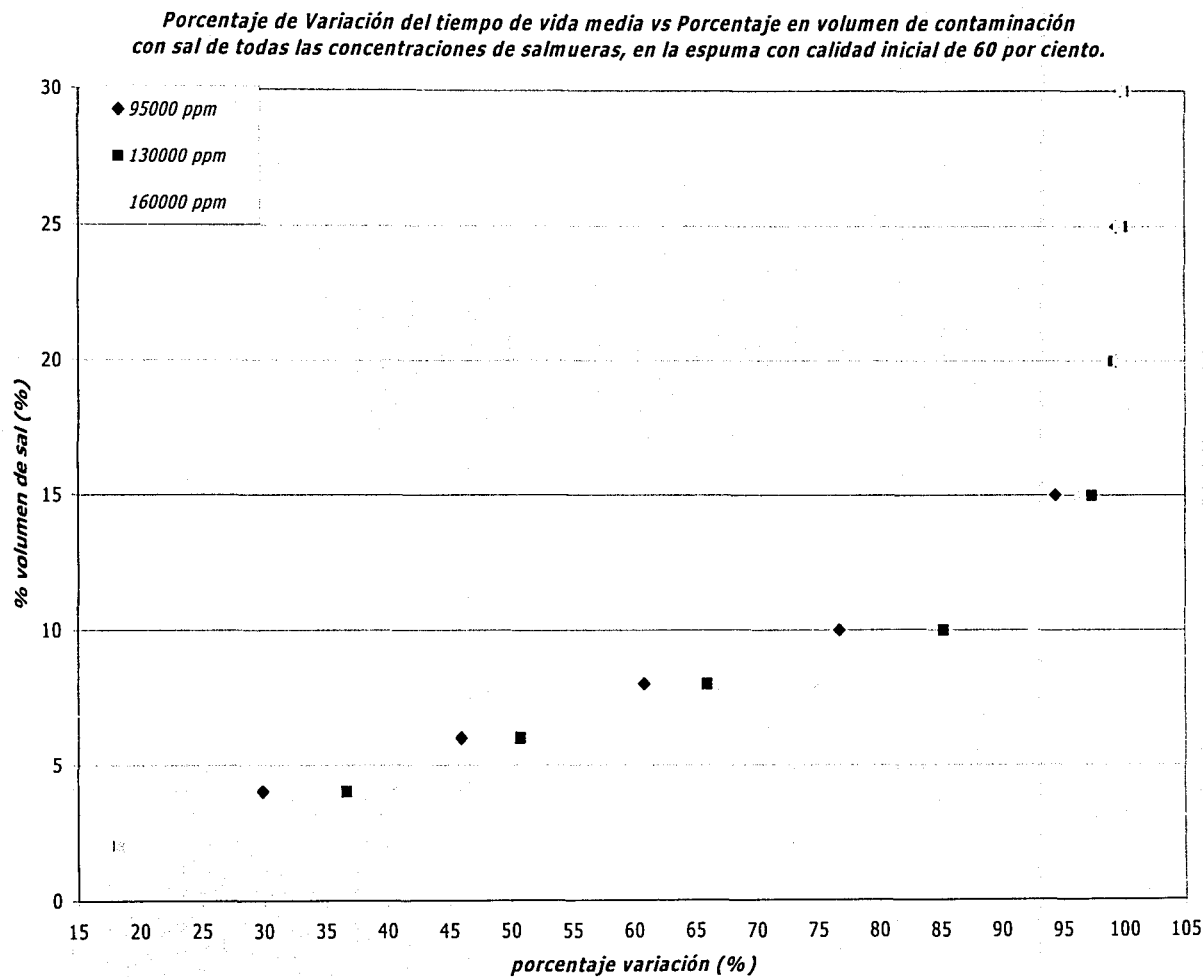
B-25

Gráfica B-13 Tiempo de Vida Media de la espuma de calidad inicial de 60% vs. Porcentaje en volumen de contaminación con salmuera para varias concentraciones de sal (NaCl) en la salmuera (Datos hasta 10% en volumen) (tendencia Lineal).



TESIS
FALLA DE CUBIERTA

Gráfica B-14 Porcentaje en volumen de contaminación con salmuera vs. Porcentaje de variación del tiempo de vida media de la espuma para una calidad inicial de 60% (todos los Datos).



TESIS COM
FALTA DE DATOS

6.- Manejo de datos para la calidad de 70% con diferentes salmueras y porcentajes en volumen de contaminación.

Tabla B-22: Manejo de datos para espuma con calidad de 70% y salmuera de 95000 (ppm) de concentración.

% espuma	% Sal	Vol. espuma	Vol. Sal	Vol. rompe	Vida media		delta	% tiempo	% variación
% Vol	% Vol	ml	ml	ml	horas	seg.	seg.	%	%
100	0	100	0	15.00	1:47:32	6442	0	100.00	0.00
98	2	98	2	14.70	1:30:57	5457	985	84.71	15.29
96	4	96	4	14.40	1:14:14	4454	1988	69.14	30.86
94	6	94	6	14.10	0:53:35	3215	3227	49.91	50.09
92	8	92	8	13.80	0:37:57	2277	4165	35.35	64.65
90	10	90	10	13.50	0:20:03	1203	5239	18.67	81.33
85	15	42.5	7.5	6.38	0:05:58	358	6084	5.56	94.44
80	20	40	10	6.00	0:01:30	90	6352	1.40	98.60
75	25	37.5	12.5	5.63	0:00:56	56	6386	0.87	99.13
70	30	35	15	5.25	0:00:20	20	6422	0.31	99.69

Tabla B-23: Manejo de datos para espuma con calidad de 70% y salmuera de 130000 (ppm) de concentración.

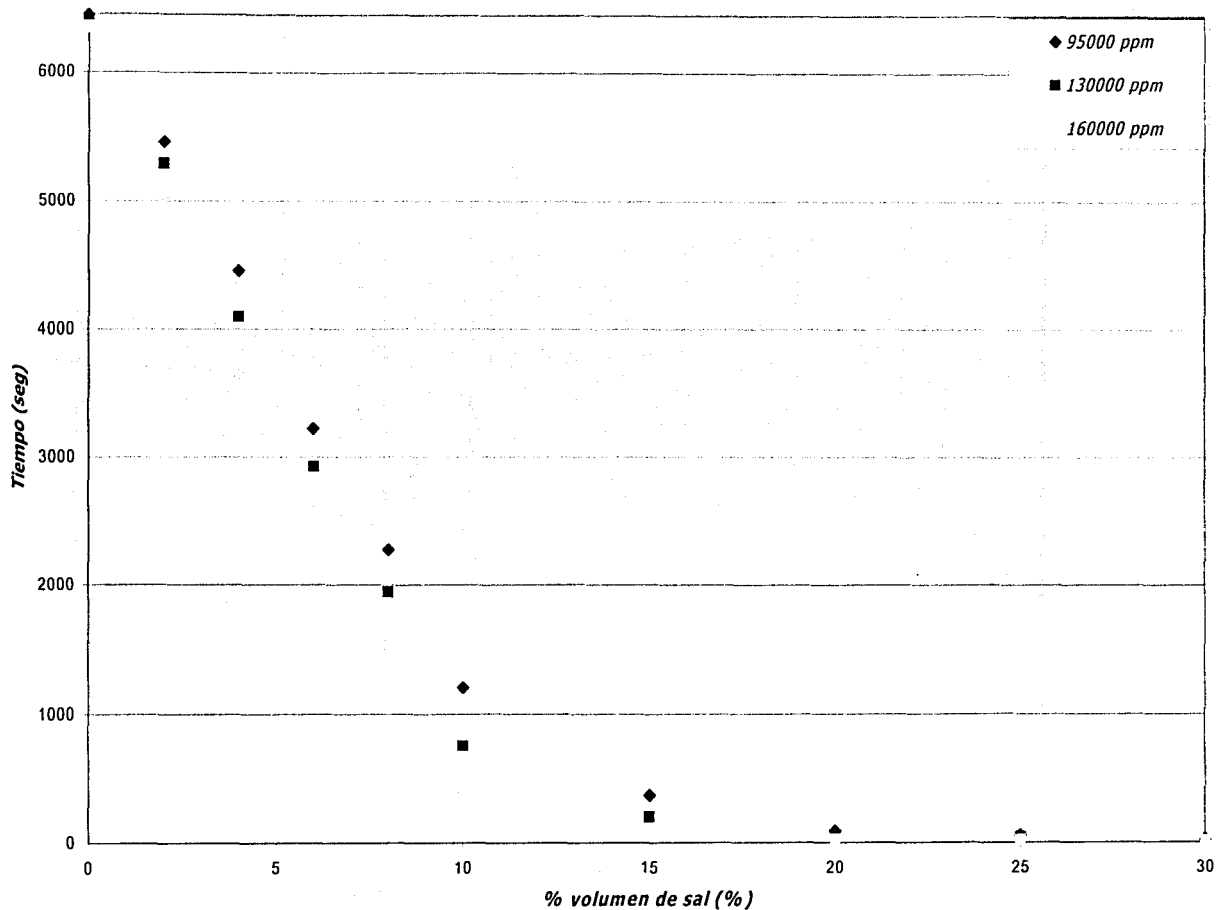
% espuma	% Sal	Vol. espuma	Vol. Sal	Vol. rompe	Vida media		delta	% tiempo	% variación
% Vol	% Vol	ml	ml	ml	horas	seg.	seg.	%	%
100	0	50	0	7.50	1:46:36	6396	0	100.00	0.00
98	2	49	1	7.35	1:28:10	5290	1106	82.71	17.29
96	4	48	2	7.20	1:08:15	4095	2301	64.02	35.98
94	6	47	3	7.05	0:48:47	2927	3469	45.76	54.24
92	8	46	4	6.90	0:32:23	1943	4453	30.38	69.62
90	10	45	5	6.75	0:12:37	757	5639	11.84	88.16
85	15	42.5	7.5	6.38	0:03:17	197	6199	3.08	96.92
80	20	40	10	6.00	0:01:02	62	6334	0.97	99.03
75	25	37.5	12.5	5.63	0:00:44	44	6352	0.69	99.31
70	30	35	15	5.25	0:00:12	12	6384	0.19	99.81

Tabla B-24: Manejo de datos para espuma con calidad de 70% y salmuera de 160000 (ppm) de concentración.

% espuma	% Sal	Vol. espuma	Vol. Sal	Vol. rompe	Vida media		delta	% tiempo	% variación
% Vol	% Vol	ml	ml	ml	horas	seg.	seg.	%	%
100	0	100	0	15.00	1:45:53	6353	0	100.00	0.00
98	2	98	2	14.70	1:23:20	5000	1353	78.70	21.30
96	4	96	4	14.40	1:00:38	3638	2715	57.26	42.74
94	6	94	6	14.10	0:43:59	2639	3714	41.54	58.46
92	8	92	8	13.80	0:25:42	1542	4811	24.27	75.73
90	10	90	10	13.50	0:06:31	391	5962	6.15	93.85
85	15	42.5	7.5	6.38	0:01:27	87	6266	1.37	98.63
80	20	40	10	6.00	0:00:23	23	6330	0.36	99.64
75	25	37.5	12.5	5.63	0:00:19	19	6334	0.30	99.70
70	30	35	15	5.25	0:00:12	12	6341	0.19	99.81

Gráfica B-15: Tiempo de Vida Media de la espuma de calidad inicial de 70% vs. Porcentaje en volumen de contaminación con salmuera para todas las concentraciones de sal (NaCl) en la salmuera (Datos Completos).

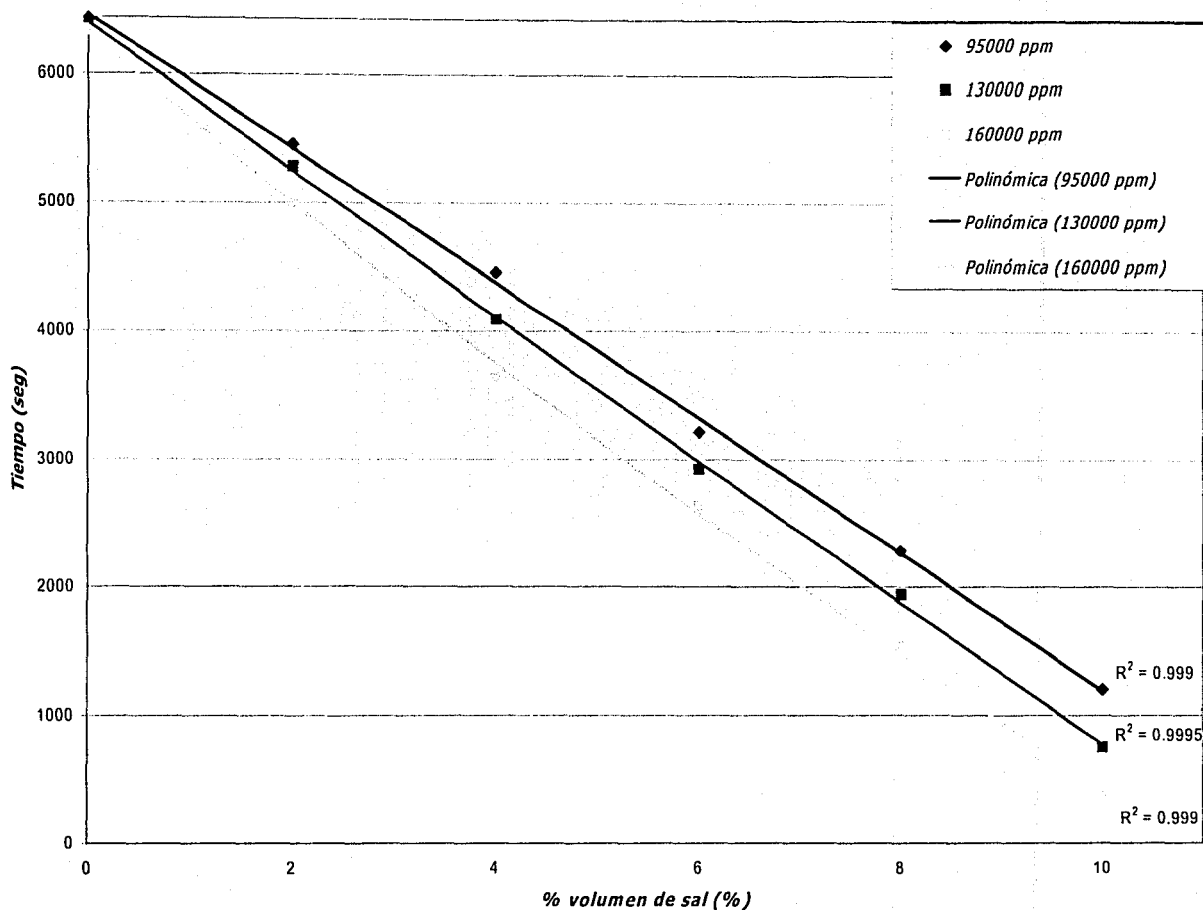
Tiempo de Vida Media vs Porcentaje en volumen de contaminación con salmueras de diferentes concentraciones para una calidad inicial de 70%



TITULO
 FALTA DE CONTENIDO

Gráfica B-16 Tiempo de Vida Media de la espuma de calidad inicial de 70% vs. Porcentaje en volumen de contaminación con salmuera para varias concentraciones de sal (NaCl) en la salmuera (Datos hasta 10% en volumen) (tendencia polinomial).

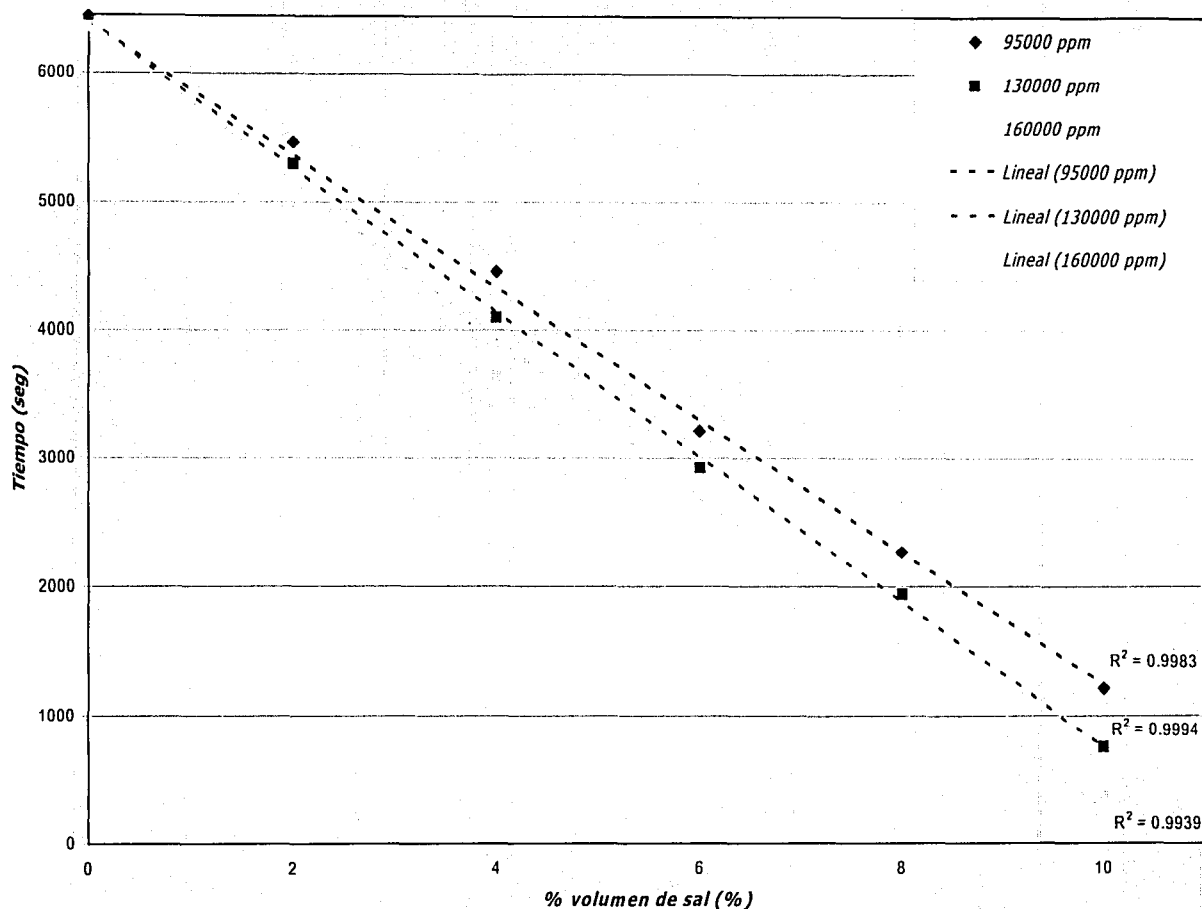
Tiempo de Vida Media vs Porcentaje en volumen de contaminación con salmueras de diferentes concentraciones para una calidad inicial de 70%



INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA
 TALLER DE CALIDAD
 13-31

Gráfica B-17: Tiempo de Vida Media de la espuma de calidad inicial de 70% vs. Porcentaje en volumen de contaminación con salmuera para varias concentraciones de sal (NaCl) en la salmuera (Datos hasta 10% en volumen) (tendencia Lineal).

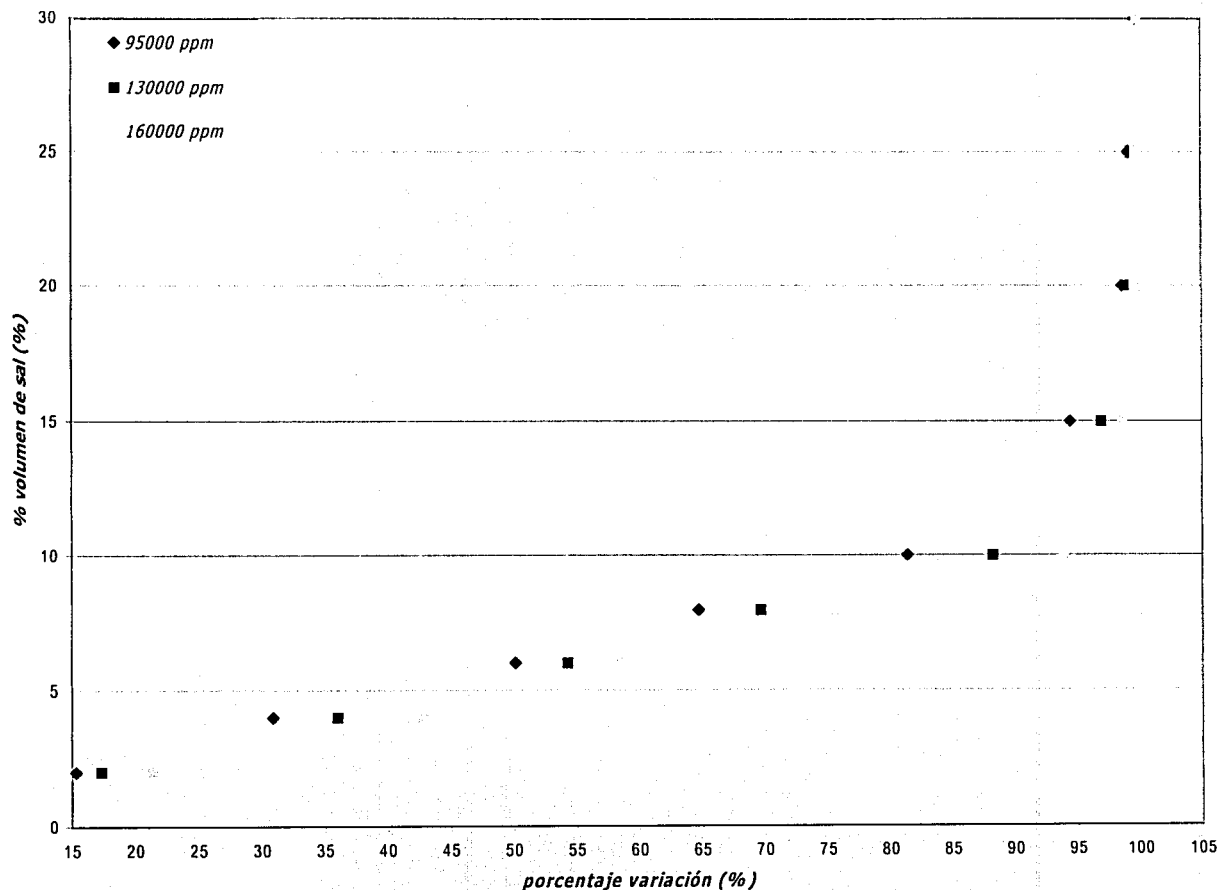
Tiempo de Vida Media vs Porcentaje en volumen de contaminación con salmueras de diferentes concentraciones para una calidad inicial de 70%



13-32
FALTA DE DATOS

Gráfica B-18: Porcentaje en volumen de contaminación con salmuera vs. Porcentaje de variación del tiempo de vida media de la espuma para una calidad inicial de 70% (todos los Datos).

Porcentaje de Variación del tiempo de vida media vs Porcentaje en volumen de contaminación con sal de todas las concentraciones de salmueras, en la espuma con calidad inicial de 70 por ciento.



FALLA DE CALIDAD

7.- Manejo de datos para la calidad de 80% con diferentes salmueras y porcentajes en volumen de contaminación.

Tabla B-25: Manejo de datos para espuma con calidad de 80% y salmuera de 95000 (ppm) de concentración.

% espuma	% Sal	Vol. espuma	Vol. Sal	Vol. rompe	Vida media		delta	% tiempo	% variación
% Vol	% Vol	ml	ml	ml	horas	seg.	seg.	%	%
100	0	100	0	10.00	2:05:20	7520	0	100.00	0.00
98	2	98	2	9.80	1:47:19	6439	1081	85.63	14.38
96	4	96	4	9.60	1:28:48	5328	2192	70.85	29.15
94	6	94	6	9.40	1:07:23	4043	3477	53.76	46.24
92	8	92	8	9.20	0:43:32	2612	4908	34.73	65.27
90	10	90	10	9.00	0:20:24	1224	6296	16.28	83.72
85	15	42.5	7.5	4.25	0:02:19	139	7381	1.85	98.15
80	20	40	10	4.00	0:01:03	63	7457	0.84	99.16
75	25	37.5	12.5	3.75	0:00:41	41	7479	0.55	99.45
70	30	35	15	3.50	0:00:19	19	7501	0.25	99.75

Tabla B-26: Manejo de datos para espuma con calidad de 80% y salmuera de 130000 (ppm) de concentración.

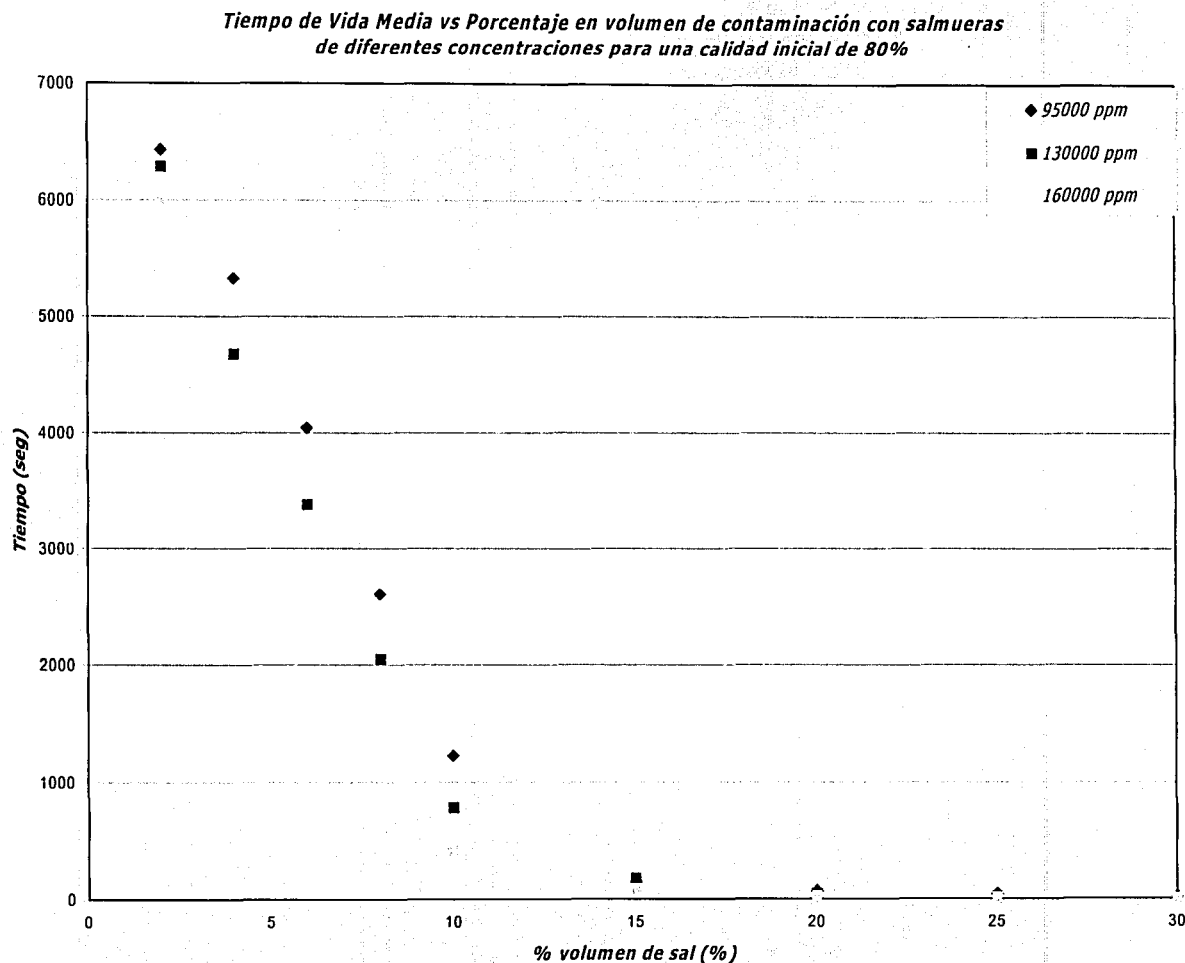
% espuma	% Sal	Vol. espuma	Vol. Sal	Vol. rompe	Vida media		delta	% tiempo	% variación
% Vol	% Vol	ml	ml	ml	horas	seg.	seg.	%	%
100	0	50	0	5.00	2:05:04	7504	0	100.00	0.00
98	2	98	2	9.80	1:44:55	6295	1209	83.89	16.11
96	4	96	4	9.60	1:17:56	4676	2828	62.31	37.69
94	6	94	6	9.40	0:56:21	3381	4123	45.06	54.94
92	8	92	8	9.20	0:34:10	2050	5454	27.32	72.68
90	10	45	5	4.50	0:12:53	773	6731	10.30	89.70
85	15	42.5	7.5	4.25	0:02:43	163	7341	2.17	97.83
80	20	40	10	4.00	0:00:41	41	7463	0.55	99.45
75	25	37.5	12.5	3.75	0:00:15	15	7489	0.20	99.80
70	30	35	15	3.50	0:00:02	2	7502	0.03	99.97

ANEXOS.

Tabla B-27: Manejo de datos para espuma con calidad de 80% y salmuera de 160000 (ppm) de concentración.

% espuma	% Sal	Vol. espuma	Vol. Sal	Vol. rompe	Vida media		delta	% tiempo	% variación
% Vol	% Vol	ml	ml	ml	horas	seg.	seg.	%	%
100	0	100	0	10.00	2:05:18	7518	0	100.00	0.00
98	2	98	2	9.80	1:39:59	5999	1519	79.80	20.20
96	4	96	4	9.60	1:16:12	4572	2946	60.81	39.19
94	6	94	6	9.40	0:51:30	3090	4428	41.10	58.90
92	8	92	8	9.20	0:30:37	1837	5681	24.43	75.57
90	10	90	10	9.00	0:06:46	406	7112	5.40	94.60
85	15	42.5	7.5	4.25	0:01:19	79	7439	1.05	98.95
80	20	40	10	4.00	0:00:22	22	7496	0.29	99.71
75	25	37.5	12.5	3.75	0:00:08	8	7510	0.11	99.89
70	30	35	15	3.50	0:00:02	2	7516	0.03	99.97

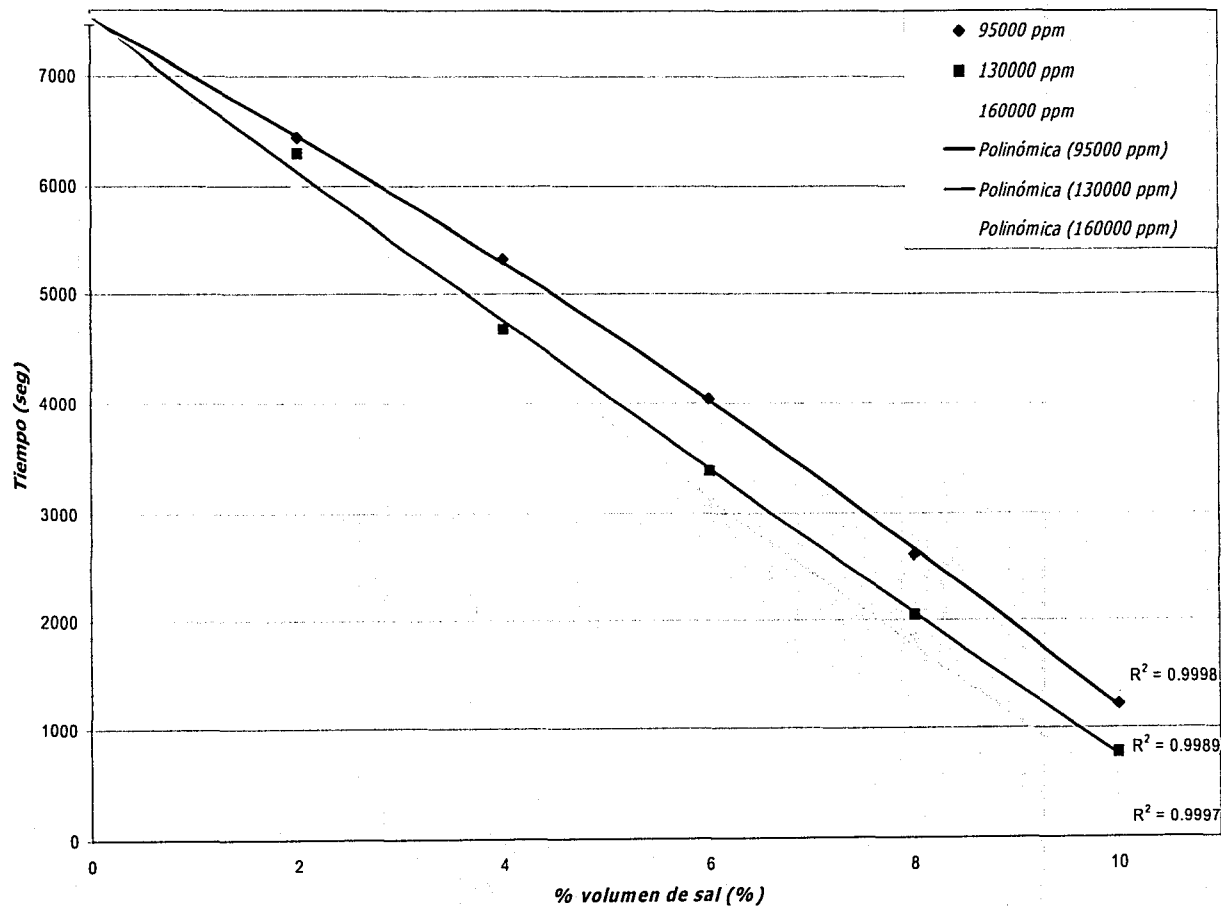
Gráfica B-19: Tiempo de Vida Media de la espuma de calidad inicial de 80% vs. Porcentaje en volumen de contaminación con salmuera para todas las concentraciones de sal (NaCl) en la salmuera (Datos Completos).



TESIS CON
FALTA DE ORDEN

Gráfica B-20 Tiempo de Vida Media de la espuma de calidad inicial de 80% vs. Porcentaje en volumen de contaminación con salmuera para varias concentraciones de sal (NaCl) en la salmuera (Datos hasta 10% en volumen) (tendencia polinomial).

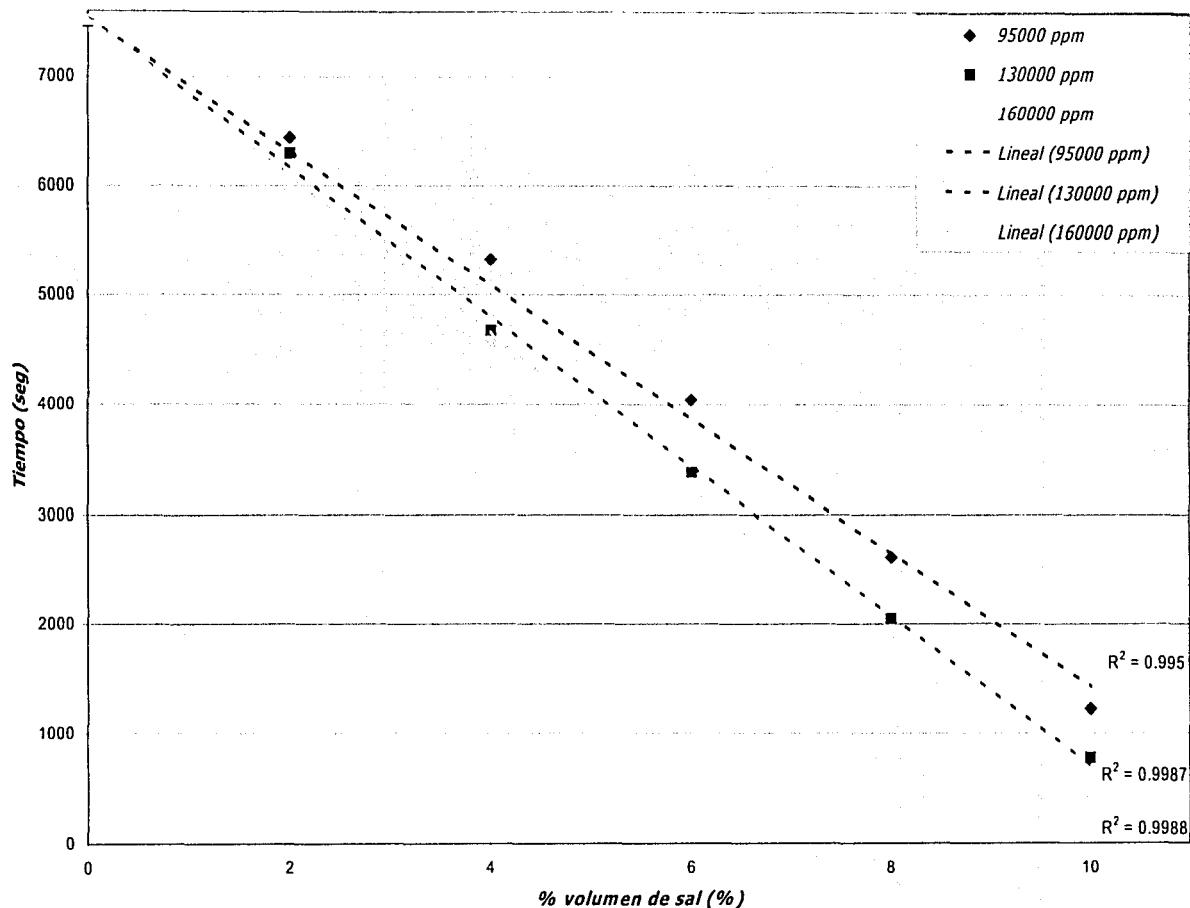
Tiempo de Vida Media vs Porcentaje en volumen de contaminación con salmueras de diferentes concentraciones para una calidad inicial de 80%



TESIS
FALTA DE ORIGEN

Gráfica B-21: Tiempo de Vida Media de la espuma de calidad inicial de 80% vs. Porcentaje en volumen de contaminación con salmuera para varias concentraciones de sal (NaCl) en la salmuera (Datos hasta 10% en volumen) (tendencia Lineal).

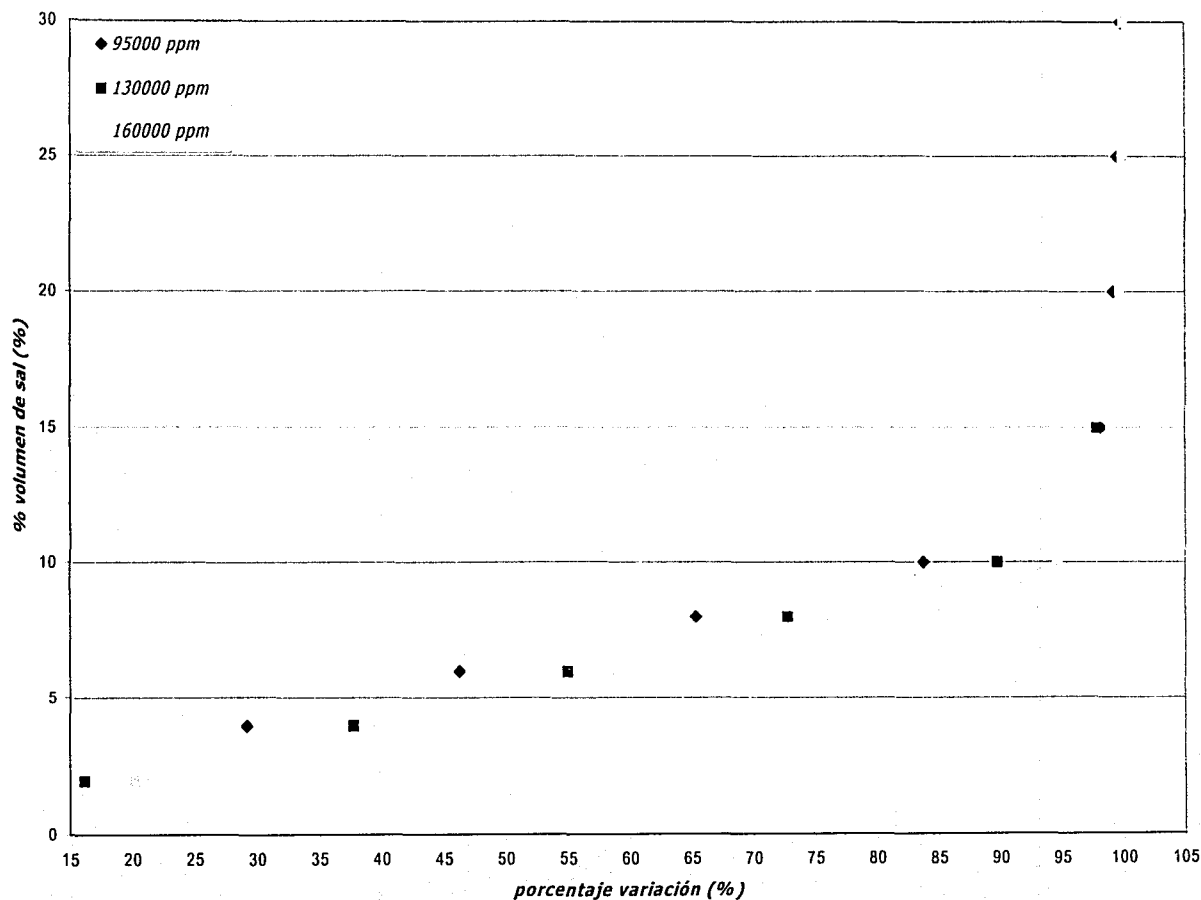
Tiempo de Vida Media vs Porcentaje en volumen de contaminación con salmueras de diferentes concentraciones para una calidad inicial de 80%



TRIS C. C.
FALLA DE CONCRETO

Gráfica B-22: Porcentaje en volumen de contaminación con salmuera vs. Porcentaje de variación del tiempo de vida media de la espuma para una calidad inicial de 80% (todos los Datos).

Porcentaje de Variación del tiempo de vida media vs Porcentaje en volumen de contaminación con sal de todas las concentraciones de salmueras, en la espuma con calidad inicial de 80 por ciento.



TESIS CON
FALLA DE CONTENIDO

ANEXOS.

8.- Manejo de datos para la calidad de 90% con diferentes salmueras y porcentajes en volumen de contaminación.

Tabla B-28: Manejo de datos para espuma con calidad de 90% y salmuera de 95000 (ppm) de concentración.

% espuma % Vol	% Sal % Vol	Vol. espuma ml	Vol. Sal ml	Vol. rompe ml	Vida media		delta	% tiempo %	% variación %
					horas	seg.	seg.		
100	0	100	0	5.00	1:27:53	5273	0	100.00	0.00
98	2	98	2	4.90	1:13:09	4389	884	83.24	16.76
96	4	96	4	4.80	1:01:49	3709	1564	70.34	29.66
94	6	94	6	4.70	0:42:59	2579	2694	48.91	51.09
92	8	92	8	4.60	0:30:21	1821	3452	34.53	65.47
90	10	90	10	4.50	0:18:42	1122	4151	21.28	78.72
85	15	85	15	4.25	0:01:07	67	5206	1.27	98.73
80	20	40	10	2.00	0:00:31	31	5242	0.59	99.41
75	25	37.5	12.5	1.88	0:00:18	18	5255	0.34	99.66
70	30	35	15	1.75	0:00:10	10	5263	0.19	99.81

Tabla B-29: Manejo de datos para espuma con calidad de 90% y salmuera de 130000 (ppm) de concentración.

% espuma % Vol	% Sal % Vol	Vol. espuma ml	Vol. Sal ml	Vol. rompe ml	Vida media		delta	% tiempo %	% variación %
					horas	seg.	seg.		
100	0	100	0	5.00	1:27:52	5272	0	100.00	0.00
98	2	98	2	4.90	1:10:20	4220	1052	80.05	19.95
96	4	96	4	4.80	0:55:42	3342	1930	63.39	36.61
94	6	94	6	4.70	0:38:23	2303	2969	43.68	56.32
92	8	92	8	4.60	0:24:15	1455	3817	27.60	72.40
90	10	90	10	4.50	0:12:02	722	4550	13.69	86.31
85	15	42.5	7.5	2.13	0:00:42	42	5230	0.80	99.20
80	20	40	10	2.00	0:00:18	18	5254	0.34	99.66
75	25	37.5	12.5	1.88	0:00:11	11	5261	0.21	99.79
70	30	35	15	1.75	0:00:01	1	5271	0.02	99.98

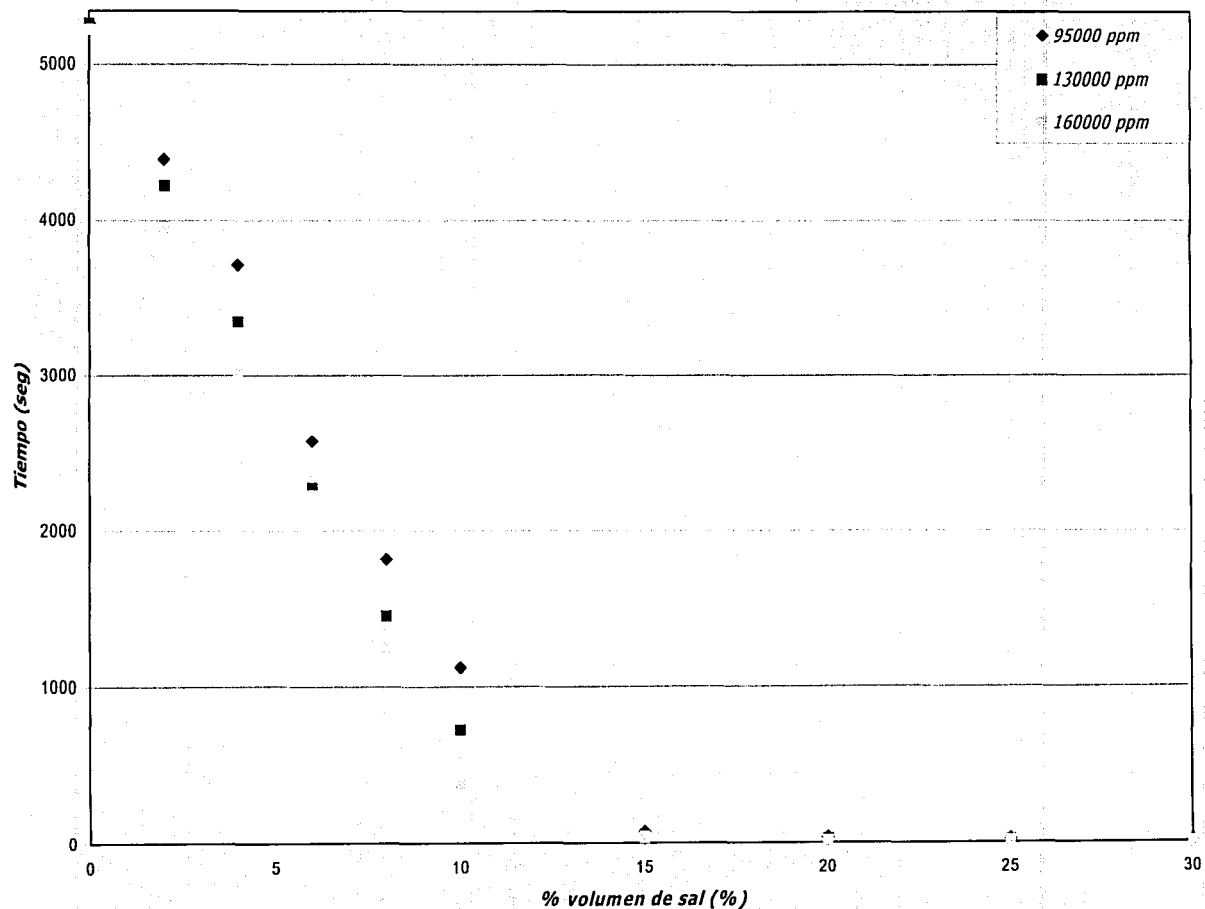
TRABAJO
FALLA DE

Tabla B-30: Manejo de datos para espuma con calidad de 90% y salmuera de 160000 (ppm) de concentración.

% espuma	% Sal	Vol. espuma	Vol. Sal	Vol. rompe	Vida media		delta	% tiempo	% variación
% Vol	% Vol	ml	ml	ml	horas	seg.	seg.	%	%
100	0	100	0	5.00	1:27:10	5230	0	100.00	0.00
98	2	98	2	4.90	1:05:57	3957	1273	75.66	24.34
96	4	96	4	4.80	0:50:24	3024	2206	57.82	42.18
94	6	94	6	4.70	0:39:14	2354	2876	45.01	54.99
92	8	92	8	4.60	0:20:54	1254	3976	23.98	76.02
90	10	90	10	4.50	0:06:16	376	4854	7.19	92.81
85	15	85	15	4.25	0:00:33	33	5197	0.63	99.37
80	20	40	10	2.00	0:00:10	10	5220	0.19	99.81
75	25	37.5	12.5	1.88	0:00:08	8	5222	0.15	99.85
70	30	35	15	1.75	0:00:03	3	5227	0.06	99.94

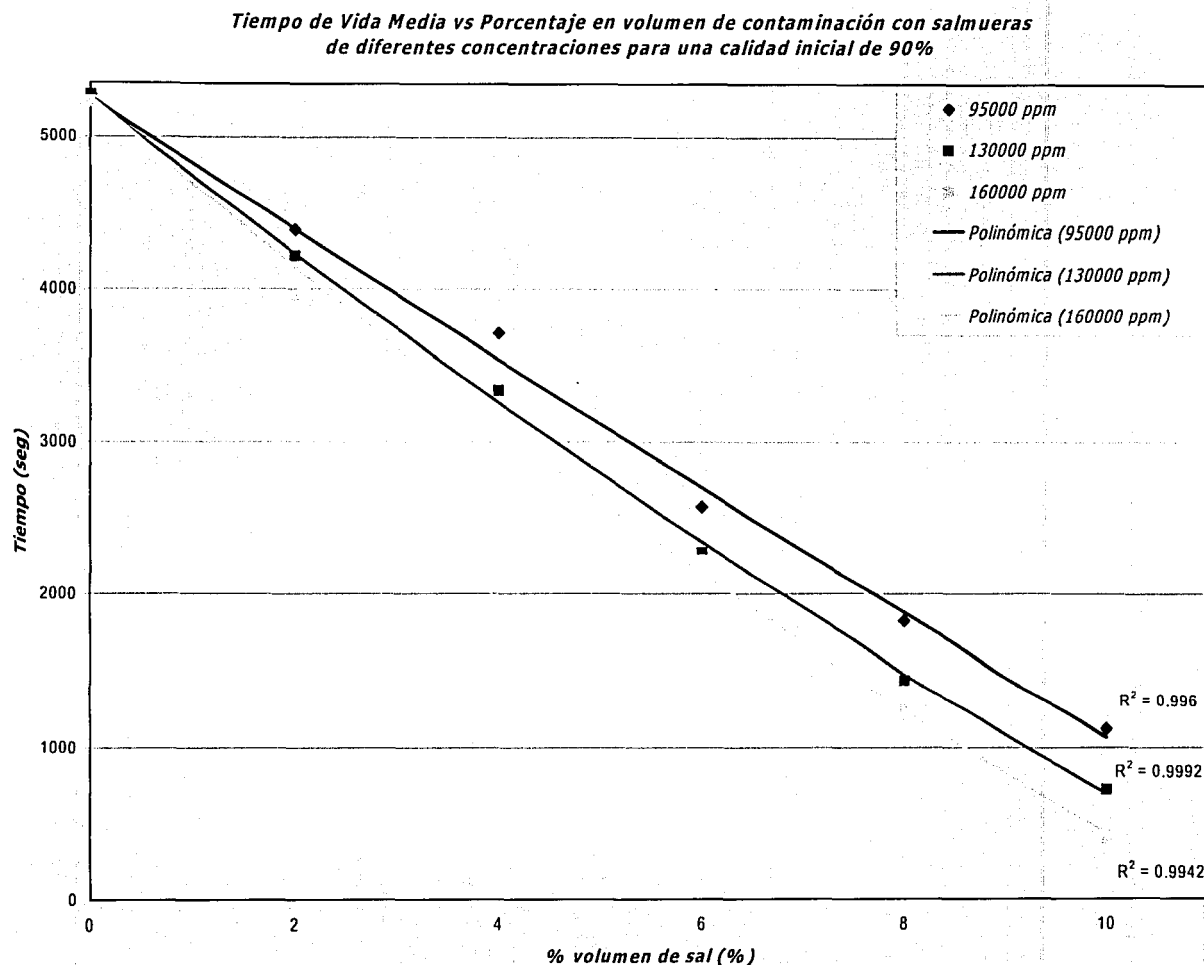
Gráfica B-23: Tiempo de Vida Media de la espuma de calidad inicial de 90% vs. Porcentaje en volumen de contaminación con salmuera para todas las concentraciones de sal (NaCl) en la salmuera (Datos Completos).

Tiempo de Vida Media vs Porcentaje en volumen de contaminación con salmuera de diferentes concentraciones para una calidad inicial de 90%



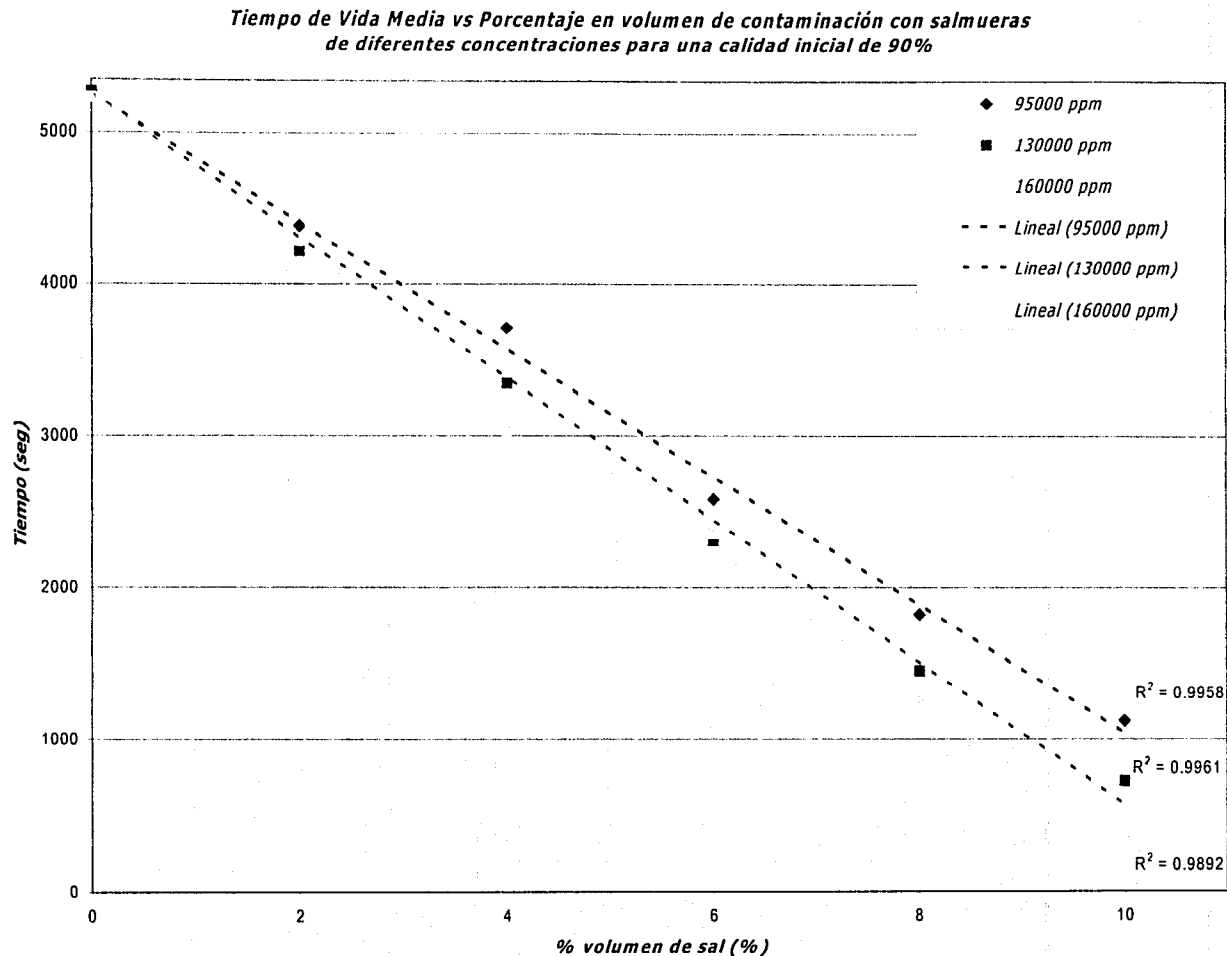
TESIS
UNIVERSIDAD DE COLOMBIA

Gráfica B-24 Tiempo de Vida Media de la espuma de calidad 90% vs. Porcentaje en volumen de contaminación con salmuera para varias concentraciones de sal (NaCl) en la salmuera (Datos hasta 10% en volumen) (tendencia polinomial).



TESIS
FALTA DE DATOS

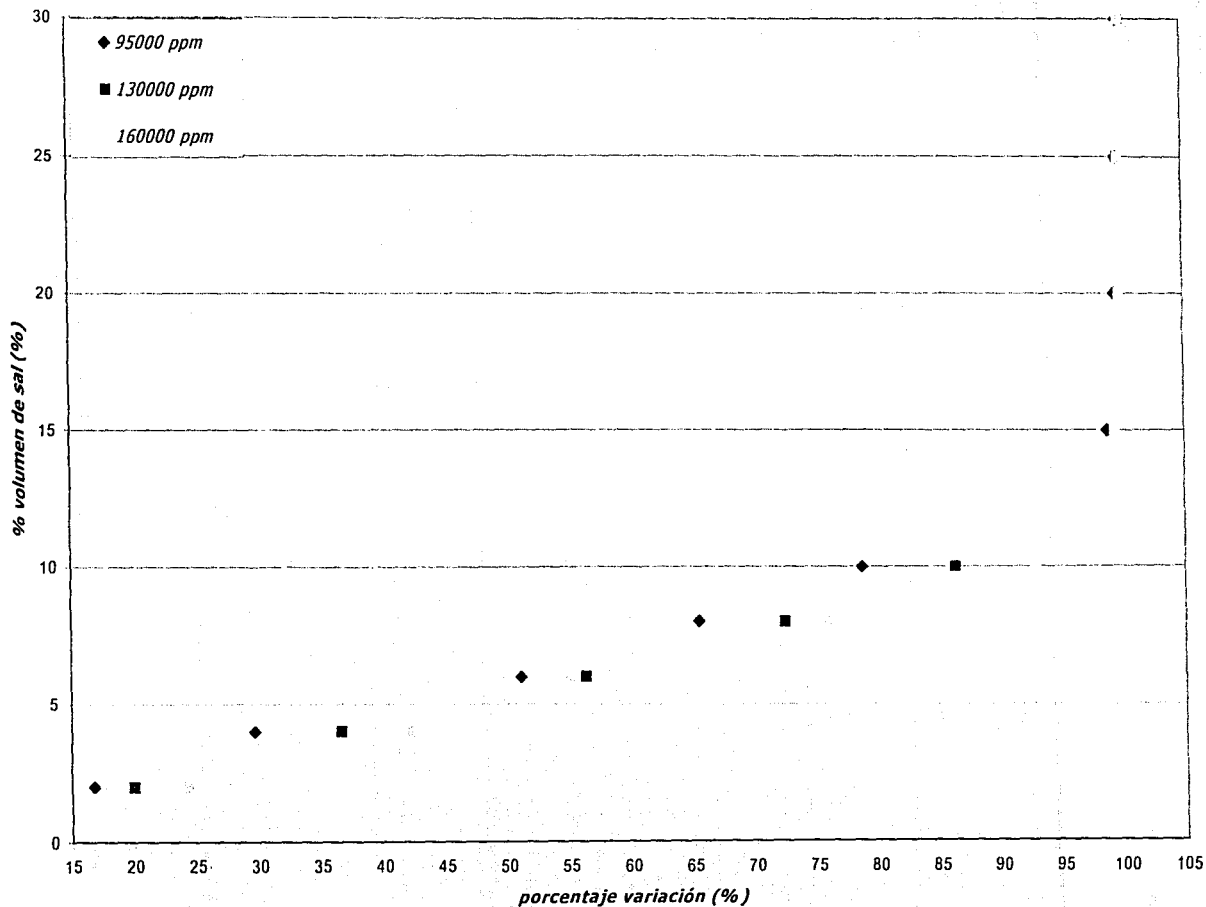
Gráfica B-25: Tiempo de Vida Media de la espuma de calidad 90% vs. Porcentaje en volumen de contaminación con salmuera para varias concentraciones de sal (NaCl) en la salmuera (Datos hasta 10% en volumen) (tendencia Lineal).



TESIS
FALLA
2007

Gráfica B-26: Porcentaje en volumen de contaminación con salmuera vs. Porcentaje de variación del tiempo de vida media de la espuma para una calidad de 90% (todos los Datos).

Porcentaje de Variación del tiempo de vida media vs Porcentaje en volumen de contaminación con sal de todas las concentraciones de salmueras, en la espuma con calidad inicial de 90 por ciento.



TESIS C
FALTA DE DATOS

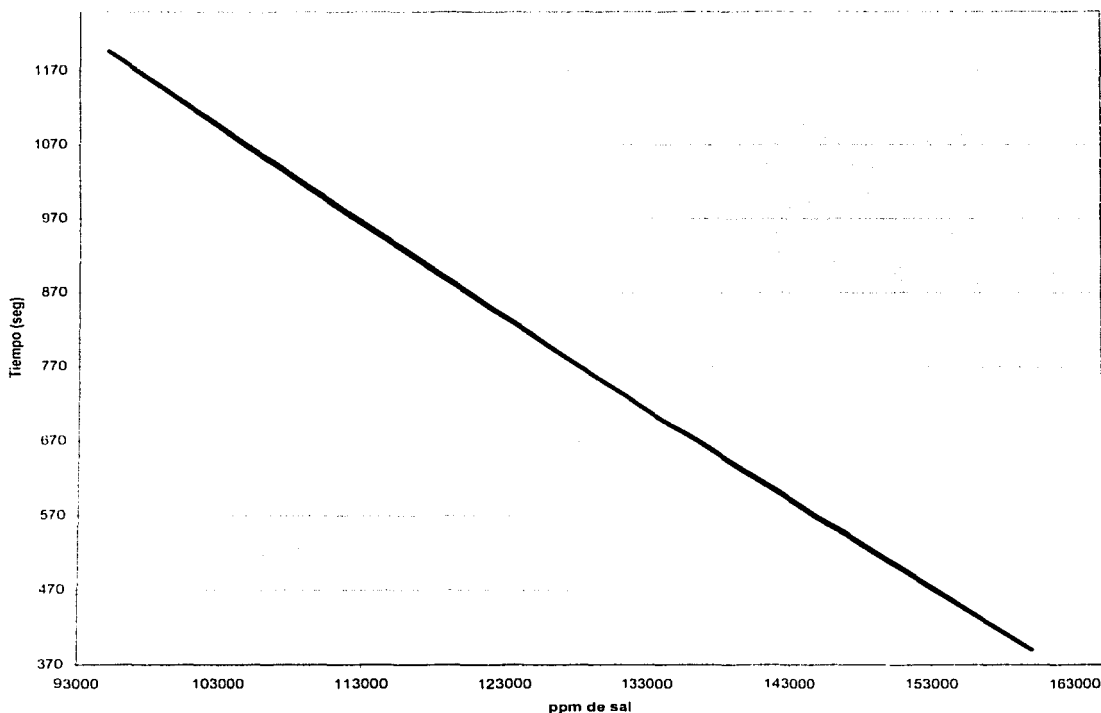
ANEXOS.

- 9.- **Tabla B-32:** Datos de los promedios del tiempo de vida media a 10% en volumen de contaminación por salmuera a diferentes concentraciones de (NaCl) para la espuma a todas las calidades manejadas Medidas y Calculadas (Ecuación 4.3).

Concentración de salmuera (ppm)	Prom. Tiempo de Vida media medida (seg.)	Tiempo de Vida media calculada (seg.)	Porcentaje de error (%)
95000	1196.4	1188.2	0.6853895
130000	749.2	757.7	1.12181602
160000	390	388.7	0.33333333

Gráfica B-27: Promedio de tiempo de vida media a 10% en volumen de contaminación con las salmueras a diferentes concentraciones de (NaCl).

promedio tiempo de vida media a 10% de contaminación en volumen de sal vs concentración de sal en la salmuera (ppm)



ANEXOS.

- 10.- Tiempos de vida media para la espuma a diferentes calidades, bajo la influencia de una concentración de salmuera a diferentes volúmenes de contaminación, Medidas y Calculadas (Ecuación 4.7).

Tabla B-33: Tiempos de vida media comparados para una concentración de salmuera de 95000 (ppm).

Concentración de sal (NaCl) en la salmuera: 95000 (ppm)				
Calidad (%)	% en volumen de salmuera	Prom. Tiempo de Vida Media (medido) seg.)	Tiempo de Vida Media (calculado) (seg.)	Porcentaje de error (%)
55	2	3625	3628.44	0.095
	4	2998	3018.88	0.696
	6	2237	2409.32	7.703
	8	1673	1799.76	7.577
	10	1197	1190.20	0.568
60	2	4544	4438.04	2.332
	4	3724	3626.08	2.629
	6	2873	2814.12	2.049
	8	2083	2002.16	3.881
	10	1236	1190.20	3.706
70	2	5457	5358.04	1.813
	4	4454	4316.08	3.097
	6	3215	3274.12	1.839
	8	2277	2232.16	1.969
	10	1203	1190.20	1.064
80	2	6439	6278.04	2.500
	4	5328	5006.08	6.042
	6	4043	3734.12	7.640
	8	2612	2462.16	5.737
	10	1224	1190.20	2.761
90	2	4389	4446.04	1.300
	4	3709	3632.08	2.074
	6	2579	2818.12	9.272
	8	1821	2004.16	10.058
	10	1122	1190.20	6.078

Tabla B-34: Tiempos de vida media comparados para una concentración de salmuera de 130000 (ppm).

Concentración de sal (NaCl) en la salmuera: 130000 (ppm)				
Calidad (%)	% en volumen de salmuera	Prom. Tiempo de Vida Media (medido) (seg.)	Tiempo de Vida Media (calculado) (seg.)	Porcentaje de error (%)
55	2	3416	3542.34	3.698
	4	2627	2846.68	8.362
	6	1987	2151.02	8.255
	8	1323	1455.36	10.005
	10	714	759.70	6.401
60	2	4312	4351.94	0.926
	4	3341	3453.88	3.379
	6	2600	2555.82	1.699
	8	1799	1657.76	7.851
	10	780	759.70	2.603
70	2	5290	5271.94	0.341
	4	4095	4143.88	1.194
	6	2927	3015.82	3.035
	8	1943	1887.76	2.843
	10	757	759.70	0.357
80	2	6295	6191.94	1.637
	4	4676	4833.88	3.376
	6	3381	3475.82	2.804
	8	2050	2117.76	3.305
	10	773	759.70	1.721
90	2	4220	4359.94	3.316
	4	3342	3459.88	3.527
	6	2303	2559.82	11.152
	8	1455	1659.76	14.073
	10	722	759.70	5.222

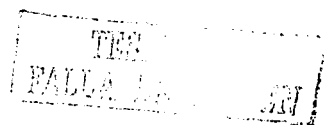


Tabla B-35: Tiempos de vida media comparados para una concentración de salmuera de 160000 (ppm).

Concentración de sal (NaCl) en la salmuera: 160000 (ppm)				
Calidad (%)	% en volumen de salmuera	Prom. Tiempo de Vida Media (medido) (seg.)	Tiempo de Vida Media (calculado) (seg.)	Porcentaje de error (%)
55	2	3360	3468.54	3.230
	4	2472	2699.08	9.186
	6	1815	1929.62	6.315
	8	1137	1160.16	2.037
	10	388	390.70	0.696
60	2	4274	4278.14	0.097
	4	3101	3306.28	6.620
	6	2188	2334.42	6.692
	8	1312	1362.56	3.854
	10	389	390.70	0.437
70	2	5000	5198.14	3.963
	4	3638	3996.28	9.848
	6	2639	2794.42	5.889
	8	1542	1592.56	3.279
	10	391	390.70	0.077
80	2	5999	6118.14	1.986
	4	4572	4686.28	2.500
	6	3090	3254.42	5.321
	8	1837	1822.56	0.786
	10	406	390.70	3.768
90	2	3957	4286.14	8.318
	4	3024	3312.28	9.533
	6	2354	2338.42	0.662
	8	1254	1364.56	8.817
	10	376	390.70	3.910

ANEXOS.

- 11.- *Tabla B-36:* Tiempos de vida media para la espuma limpia a diferentes calidades, Medidas y Calculadas (Ecuación 4.1 y 4.2).

<i>calidades</i>	<i>Prom. Tiempo de vida media medido (seg.)</i>	<i>tiempo de vida media calculado (seg.)</i>	<i>% error</i>
55	4238	-----	-----
60	5270.33	5250	0.39
70	6397	6400	0.05
80	7514	7550	0.48
90	5358.33	5260	0.03

Tabla B – 37.- Datos completos para las tres pruebas realizadas con una salmuera de 95000 (ppm)

Calidad de la espuma (%)	Concentración de la Salmuera 95000 (partes por millón) Porcentaje en volumen de Contaminación en la espuma									
	0	2	4	6	8	10	15	20	25	30
55	4242	3526	2863	2137	1743	1247	293	40	35	24
	4462	3689	3098	2317	1633	1167	268	34	32	22
	4412	3660	3033	2257	1643	1177	273	34	32	23
60	5120	4704	3874	3003	2203	1326	330	39	36	17
	5410	4474	3644	2793	2023	1176	284	32	32	15
	5400	4454	3654	2823	2023	1206	283	34	34	16
70	6692	5707	4674	3405	2437	1303	388	97	60	21
	6292	5317	4294	3115	2187	1143	338	85	53	19
	6342	5347	4394	3125	2207	1163	348	88	55	20
80	7820	6699	5543	4243	2783	1317	149	67	43	20
	7345	6289	5203	3923	2521	1171	133	60	39	18
	7395	6329	5238	3963	2532	1184	135	62	41	19
90	5528	4604	3909	2764	1946	1227	72	33	19	10
	5138	4261	3599	2474	1751	1062	64	30	17	10
	5153	4302	3619	2499	1766	1077	65	30	18	10

Tabla B – 38.- Datos completos para las tres pruebas realizadas con una salmuera de 130000 (ppm)

Calidad de la espuma (%)	Concentración de la Salmuera 130000 (partes por millón)									
	Porcentaje en volumen de Contaminación en la espuma									
	0	2	4	6	8	10	15	20	25	30
55	4469	3666	2842	2157	1423	764	135	69	36	2
	3999	3271	2512	1892	1263	684	118	64	34	2
	4054	3311	2527	1912	1283	694	122	65	35	2
60	5592	4592	3581	2800	1919	840	150	47	8	3
	5082	4152	3201	2480	1719	740	133	42	6	3
	5142	4192	3241	2520	1759	760	137	43	7	3
70	6776	5590	4375	3147	2063	817	207	64	45	12
	6146	5110	3935	2807	1883	717	191	61	43	12
	6266	5170	3975	2827	1883	737	193	61	44	12
80	7964	6695	5036	3634	2210	813	173	44	16	2
	7224	6075	4476	3221	1950	748	153	39	14	2
	7324	6115	4516	3288	1990	758	163	40	15	2
90	5602	4500	3552	2453	1545	762	44	19	11	1
	5062	4040	3232	2213	1395	687	41	17	11	1
	5152	4120	3242	2243	1425	717	41	18	11	1

Tabla B – 39.- Datos completos para las tres pruebas realizadas con una salmuera de 160000 (ppm)

Calidad de la espuma (%)	Concentración de la Salmuera 160000 (partes por millón)									
	Porcentaje en volumen de Contaminación en la espuma									
	0	2	4	6	8	10	15	20	25	30
55	4488	3615	2632	1915	1217	408	264	78	39	4
	3968	3215	2382	1750	1092	376	248	73	37	4
	4048	3250	2402	1780	1102	380	250	74	38	4
60	5519	4554	3241	2308	1392	407	201	25	24	12
	5039	4114	3020	2128	1267	379	186	23	22	12
	5129	4154	3042	2128	1277	381	189	24	23	12
70	6663	5230	3788	2770	1610	411	91	24	20	12
	6173	4870	3558	2568	1504	380	84	22	18	12
	6223	4900	3568	2579	1512	382	86	23	19	12
80	6663	5230	3788	2770	1610	411	91	24	20	12
	6173	4870	3558	2568	1504	380	84	22	18	12
	6223	4900	3568	2579	1512	382	86	23	19	12
90	5500	4167	3184	2464	1319	392	35	11	9	3
	5090	3847	2934	2294	1219	367	32	9	7	3
	5100	3857	2954	2304	1224	369	32	10	8	3

ANEXO C.

A continuación, se desarrolla la metodología de cálculo del tiempo de vida media para la espuma (BPU) basados en los datos encontrados en las diferentes experimentaciones realizadas.

Como se desarrolló un modelo lineal para la predicción del tiempo de vida media de la espuma para cualquier calidad, con salmueras de diferentes concentraciones de sal y con volúmenes de contaminación de las salmueras, para lograr esta predicción, se deben hallar por lo menos dos puntos que nos permitan despejar las incógnitas de una ecuación lineal. Así:

Para proponer un modelo de tipo lineal, se debe tener una ecuación de la siguiente forma:

$$Y = mX + B$$

Ec. - V.4

donde:

Y = Variable dependiente, que sería el tiempo de vida media de la espuma.

X = Variable independiente, para nuestro caso, sería el porcentaje de contaminación en volumen de sal.

B = sería el punto de intercepción cuando la variable X fuese igual a cero, que para este caso, es el momento cuando la espuma no tiene la influencia de ningún contaminante, es decir, cuando está limpia. Para este caso será denominada como (T_{vml}) .

m = Pendiente de la ecuación que viene dada como:

$$m = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}$$

Ec. - V.5

ANEXOS.

tomando en cuenta que la variable independiente X es la contaminación en volumen de sal en la espuma, y que Y es el tiempo de vida media.

Por lo observado en las experimentaciones, los pares coordinados vienen dados como:

X_1 = sería el porcentaje de contaminación mínimo de la salmuera, es decir, una espuma limpia, sin contaminantes. Es decir:

$$X_1 = 0$$

Y_1 = Sería el tiempo de vida media de la espuma limpia. Este tiempo de vida media se define como (T_{vm1}).

El siguiente par coordinado es el último punto determinado de la línea, esto con el objeto de poder ajustar toda la recta de ajusta del tiempo de vida media a la espuma a una calidad determinada. Es decir:

X_2 = es la máxima concentración de salmuera antes de romperse totalmente. Que experimentalmente se ha determinado a 10% en volumen de contaminación con salmuera.

X_2 = 10% en volumen de contaminación de salmuera.

Y_2 = Sería el tiempo de vida media al 10% en volumen de contaminación con salmuera. Este tiempo de vida media será nombrado como ($T_{vm10(c)}$).

Es decir, los pares coordinados están dados como:

$$X_1 = 0$$

$$X_2 = 10\% \text{ en volumen de contaminación de salmuera}$$

$$Y_1 = T_{vm1}$$

$$Y_2 = T_{vm10(c)}$$

Es decir, la pendiente de la ecuación, sería:

$$m = \frac{T_{vm_{10(c)}} - T_{vml}}{10 - 0} = \frac{T_{vm_{10(c)}} - T_{vml}}{10}$$

Ec. - V.6

1.- Determinación del tiempo de vida media "base" de la espuma.

Dado que las ecuaciones encontradas, solo se plantearon en función de un solo tipo de composición de espuma, mostrado en el capítulo cuatro, se hace la aclaración que algunos factores deben corregirse cuando se tienen composiciones diferentes. Por esto, el primer punto de esta metodología, es encontrar el tiempo de vida media denominado como base de la espuma, este tiempo de vida media, no es otro mas que el tiempo de vida media para la espuma con calidad de 55 por ciento, se ha denominado como base por ser el porcentaje inicial, donde cambia el comportamiento de la espuma y se empieza a definir como tal (Mitchell et al) (Beyer et al).

A este dato, se le conocerá como:

T_{r55} = Tiempo de vida media base.

Este dato puede ser adquirido de dos formas:

- 1.1.- Tomando el dato encontrado en las pruebas desarrolladas en este trabajo de investigación, cuyo valor es de 4238 segundos.
- 1.2.- Hacer una prueba de tiempo de vida media para la espuma en cuestión, con una calidad de 55 por ciento.

2.- Determinar el tiempo de vida media de la espuma limpia, según la calidad deseada.

En este punto, debe tener en cuenta que se manejan dos rangos de calidades, por lo que se procede de la siguiente forma:

ANEXOS.

2.1.- Si se tiene un rango de calidad mayor de 55 % y hasta 80 por ciento de calidad, se utiliza la siguiente ecuación:

$\Gamma > 55\%$ hasta $\Gamma = 80\%$ tenemos:

$$T_{vml} = 115 * \Gamma - 1650$$

Ec.- V.1

donde:

Γ = Calidad de la espuma en porcentaje.

2.2.- Si se tiene una calidad superior a 80% y hasta 90% (se podría extrapolar hasta 95% de calidad, asumiendo que entre 90 y 95% de calidad se sigue con patrón mostrado entre 80 y 90%). En estos rangos, se maneja la ecuación:

De $\Gamma > 80\%$ hasta $\Gamma = 90\%$ tenemos:

$$T_{vml} = 25870 - 229 * (\Gamma)$$

Ec.- V.2

Donde:

Γ = Calidad en el punto a medir (porcentaje).

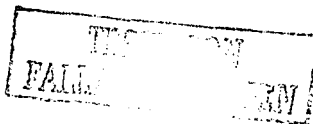
3.- Determinar el tiempo de vida media de la espuma a 10% en volumen de contaminación con salmuera, según la calidad deseada.

Esta tendencia es modelada como sigue para obtener una expresión del tiempo de vida media a 10% en volumen de contaminación con sal a diferentes concentraciones de salmuera.

$$t_{vm10(c)} = -0.0123 * c + 2356.7$$

Ec.- V.3

ecuación para concentración de sal en las salmueras de (95000 – 160000) ppm



ANEXOS.

donde:

$tvm_{10(c)}$ = Tiempo de vida media a 10% en volumen de contaminación de una salmuera con concentración específica de sal (seg.).

c = Concentración de sal en la salmuera (ppm).

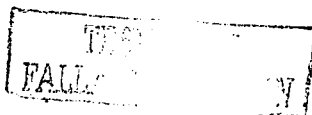
Con esto, la ecuación lineal queda determinada como:

$$Tvmc = \frac{(Tvm_{10(c)} - Tvm_l)}{10} * (pc) + Tvm_l$$

Ec.- V.7

Donde:

pc = Porcentaje de contaminación de salmuera (%).



ANEXOS.

ANEXO D.

A continuación, se presentan los datos completos de las correcciones por calidad y las comparaciones hechas con respecto a la misma calidad limpia. Para el cálculo de los valores de la espuma limpia, se utilizan las ecuaciones (V.1) y (V.2) según sea el caso:

1.- Correcciones para una espuma con calidad inicial de 55 por ciento:

Para una contaminación con salmuera de 95000 ppm de concentración de (NaCl).

Corrección de la calidad inicial 55% por contaminación con salmuera de 95000 ppm Tomando como base 100 ml de mezcla entre espuma y contaminante.				
Porcentaje de contaminación	Volumen de Líquido	Volumen de gas	Calidad	Tiempo de Vida Media
% Volumen	ml	ml	% Volumen	Seg.
0	45.0	55.0	55.0	4372
2	46.1	53.9	53.9	3625
4	47.2	52.8	52.8	2998
6	48.3	51.7	51.7	2237
8	49.4	50.6	50.6	1673
10	50.5	49.5	49.5	1197
15	53.3	46.8	46.8	278
20	56.0	44.0	44.0	36
25	58.8	41.3	41.3	33
30	61.5	38.5	38.5	23

Tabla D.1. Corrección de la calidad debido a la contaminación con salmuera de 95000 ppm, para una espuma de calidad inicial de 55 %.

En estas tablas, solo el primer valor, es considerado dentro del rango de las espumas, pero este dato, es el mismo que el de una espuma limpia. Por lo que no se puede hacer el análisis con respecto a las ecuaciones encontradas en el capítulo V.

Así, para los demás datos generados por la contaminación con la otras concentraciones de salmueras, se tienen:

ANEXOS.

Para una contaminación con salmuera de 130000 ppm de concentración de (NaCl).

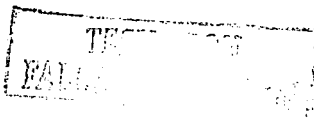
Corrección de la calidad inicial 55% por contaminación con salmuera de 130000 ppm Tomando como base 100 ml de mezcla entre espuma y contaminante.				
Porcentaje de contaminación	Volumen de Líquido	Volumen de gas	Calidad	Tiempo de Vida Media
% Volumen	ml	ml	% Volumen	Seg.
0	45.0	55.0	55.0	4174
2	46.1	53.9	53.9	3416
4	47.2	52.8	52.8	2627
6	48.3	51.7	51.7	1987
8	49.4	50.6	50.6	1323
10	50.5	49.5	49.5	714
15	53.3	46.8	46.8	125
20	56.0	44.0	44.0	66
25	58.8	41.3	41.3	35
30	61.5	38.5	38.5	2

Tabla D.2. Corrección de la calidad debido a la contaminación con salmuera de 130000 ppm, para una espuma de calidad inicial de 55 %.

Para una contaminación con salmuera de 160000 ppm de concentración de (NaCl).

Corrección de la calidad inicial 55% por contaminación con salmuera de 160000 ppm Tomando como base 100 ml de mezcla entre espuma y contaminante.				
Porcentaje de contaminación	Volumen de Líquido	Volumen de gas	Calidad	Tiempo de Vida Media
% Volumen	ml	ml	% Volumen	Seg.
0	45.0	55.0	55.0	4168
2	46.1	53.9	53.9	3360
4	47.2	52.8	52.8	2472
6	48.3	51.7	51.7	1815
8	49.4	50.6	50.6	1137
10	50.5	49.5	49.5	388
15	53.3	46.8	46.8	254
20	56.0	44.0	44.0	75
25	58.8	41.3	41.3	38
30	61.5	38.5	38.5	4

Tabla D.3. Corrección de la calidad debido a la contaminación con salmuera de 160000 ppm, para una espuma de calidad inicial de 55 %.



2.- Correcciones para una espuma con calidad inicial de 60 por ciento:

Para una contaminación con salmuera de 95000 ppm de concentración de (NaCl).

<i>Corrección de la calidad inicial 60% por contaminación con salmuera de 95000 ppm Tomando como base 100 ml de mezcla entre espuma y contaminante.</i>				
Porcentaje de contaminación	Volumen de Líquido	Volumen de gas	Calidad	Tiempo de Vida Media
% Volumen	ml	ml	% Volumen	Seg.
0	40.0	60	60	5310
2	41.2	58.8	58.8	4544
4	42.4	57.6	57.6	3724
6	43.6	56.4	56.4	2873
8	44.8	55.2	55.2	2083
10	46.0	54	54	1236
15	49.0	51	51	299
20	52.0	48	48	35
25	55.0	45	45	34
30	58.0	42	42	16

Tabla D.4. Corrección de la calidad debido a la contaminación con salmuera de 95000 ppm, para una espuma de calidad inicial de 60 %.

En esta tabla, se tienen cinco valores que entran dentro del rango de calidad de espuma ($\Gamma \geq 55 \%$), por lo que se realiza el análisis correspondiente.

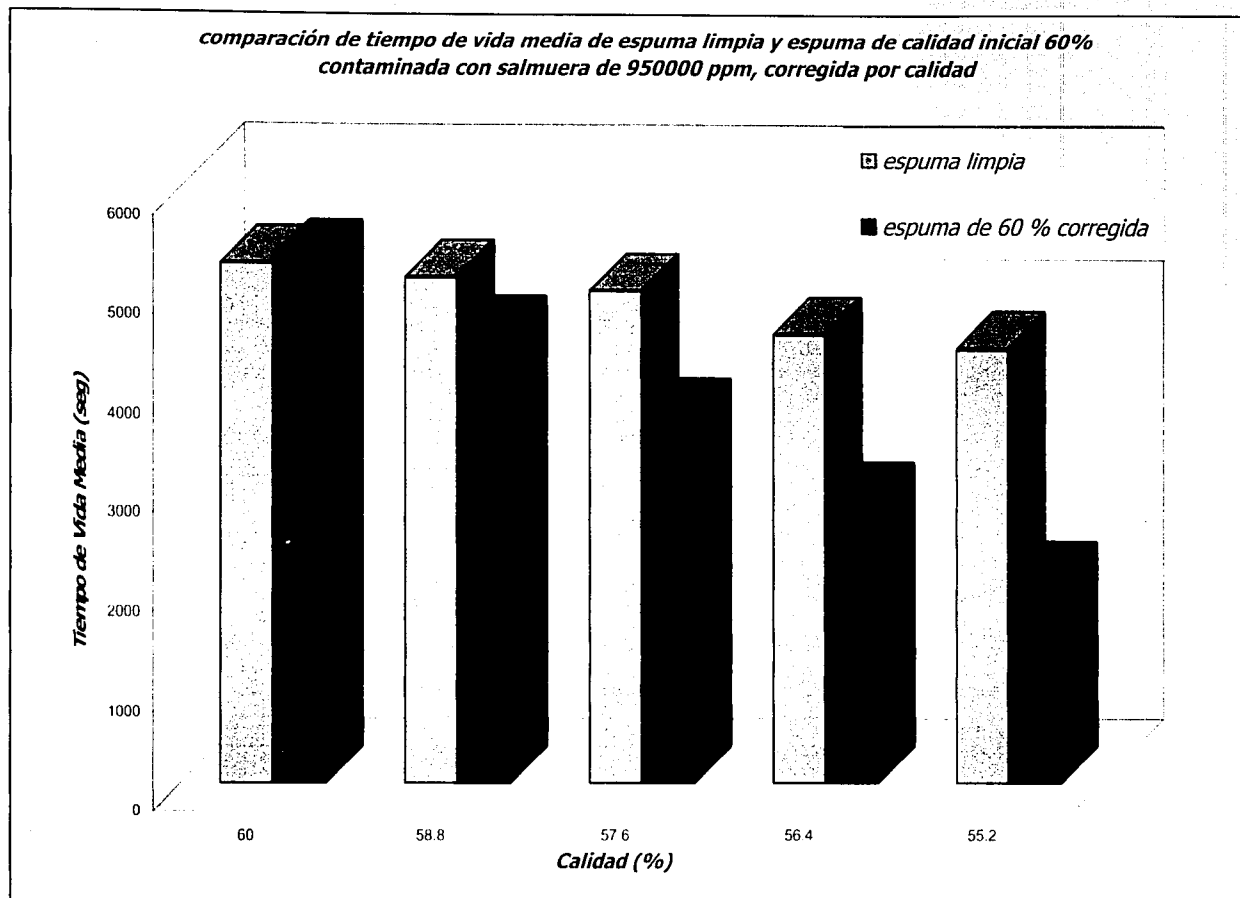
Corrección para una contaminación con salmuera de 95000 ppm de concentración de (NaCl).

<i>Corrección de la calidad debido a la contaminación con salmuera de 95000 ppm para Una espuma de 60% de calidad inicial</i>			
Calidad	Tiempo de Vida Media (Segundos)		Variación
(% en Volumen)	Medido	Calculado	(%)
60	5310	5250	1.13
58.8	4544	5112	12.50
57.6	3724	4974	33.57
56.4	2873	4533	57.78
55.2	2083	4395	110.99

Tabla D.5. Corrección y comparación de la calidad debido a la contaminación con salmuera de 95000 ppm, para una espuma de calidad inicial de 60 %.

Gráficamente se tiene:

Figura D.1. Comparación de la calidad de una espuma limpia, con una calidad corregida para una espuma de 60% de calidad inicial debido a la contaminación con salmuera de 95000 ppm.



Para una contaminación con salmuera de 130000 ppm de concentración de (NaCl).

Corrección de la calidad inicial 60% por contaminación con salmuera de 130000 ppm Tomando como base 100 ml de mezcla entre espuma y contaminante.				
Porcentaje de contaminación	Volumen de Líquido	Volumen de gas	Calidad	Tiempo de Vida Media
% Volumen	ml	ml	% Volumen	Seg.
0	40.0	60	60	5272
2	41.2	58.8	58.8	4312
4	42.4	57.6	57.6	3341
6	43.6	56.4	56.4	2600
8	44.8	55.2	55.2	1799
10	46.0	54	54	780
15	49.0	51	51	140
20	52.0	48	48	44
25	55.0	45	45	7
30	58.0	42	42	3

Tabla D.6. Corrección de la calidad debido a la contaminación con salmuera de 130000 ppm, para una espuma de calidad inicial de 60 %.

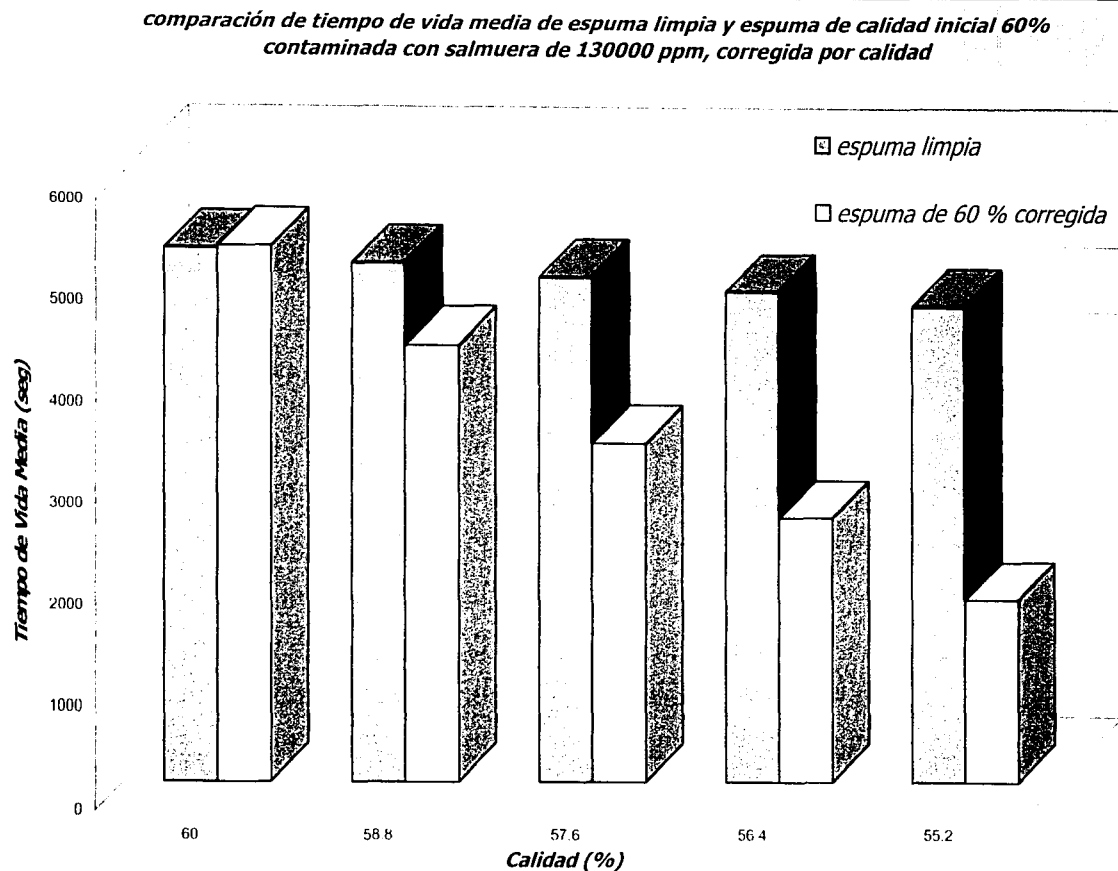
Corrección para una contaminación con salmuera de 130000 ppm de concentración de (NaCl).

Corrección de la calidad debido a la contaminación con salmuera de 130000 ppm para Una espuma de 60% de calidad inicial			
Calidad	Tiempo de Vida Media (Segundos)		Variación
(% en Volumen)	Medido	Calculado	(%)
60	5272	5250	0.42
58.8	4312	5112	18.55
57.6	3341	4974	48.88
56.4	2600	4836	86.00
55.2	1799	4698	161.15

Tabla D.7. Corrección y comparación de la calidad debido a la contaminación con salmuera de 130000 ppm, para una espuma de calidad inicial de 60 %.

Gráficamente se tiene:

Figura D.2. Comparación de la calidad de una espuma limpia, con una calidad corregida para una espuma de 60% de calidad inicial debido a la contaminación con salmuera de 130000 ppm.



TESIS CON
MAYOR DE OCHO EN

ANEXOS.

Para una contaminación con salmuera de 160000 ppm de concentración de (NaCl).

Corrección de la calidad inicial 60% por contaminación con salmuera de 160000 ppm Tomando como base 100 ml de mezcla entre espuma y contaminante.				
Porcentaje de contaminación	Volumen de Líquido	Volumen de gas	Calidad	Tiempo de Vida Media
% Volumen	ml	ml	% Volumen	Seg.
0	40.0	60	60	5229
2	41.2	58.8	58.8	4274
4	42.4	57.6	57.6	3101
6	43.6	56.4	56.4	2188
8	44.8	55.2	55.2	1312
10	46.0	54	54	389
15	49.0	51	51	192
20	52.0	48	48	24
25	55.0	45	45	23
30	58.0	42	42	12

Tabla D.8. Corrección de la calidad debido a la contaminación con salmuera de 160000 ppm, para una espuma de calidad inicial de 60 %.

Corrección para una contaminación con salmuera de 160000 ppm de concentración de (NaCl).

Corrección de la calidad debido a la contaminación con salmuera de 160000 ppm para Una espuma de 60% de calidad inicial			
Calidad	Tiempo de Vida Media (Segundos)		Variación
(% en Volumen)	Medido	Calculado	(%)
60	5229	5250	0.40
58.8	4274	5112	19.61
57.6	3101	4974	60.40
56.4	2188	4836	121.02
55.2	1312	4698	258.08

Tabla D.9. Corrección y comparación de la calidad debido a la contaminación con salmuera de 160000 ppm, para una espuma de calidad inicial de 60 %.

Gráficamente se tiene:

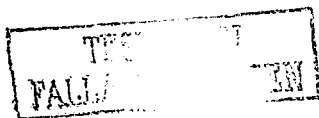


Figura D.3. Comparación de la calidad de una espuma limpia, con una calidad corregida para una espuma de 60% de calidad inicial debido a la contaminación con salmuera de 160000 ppm.

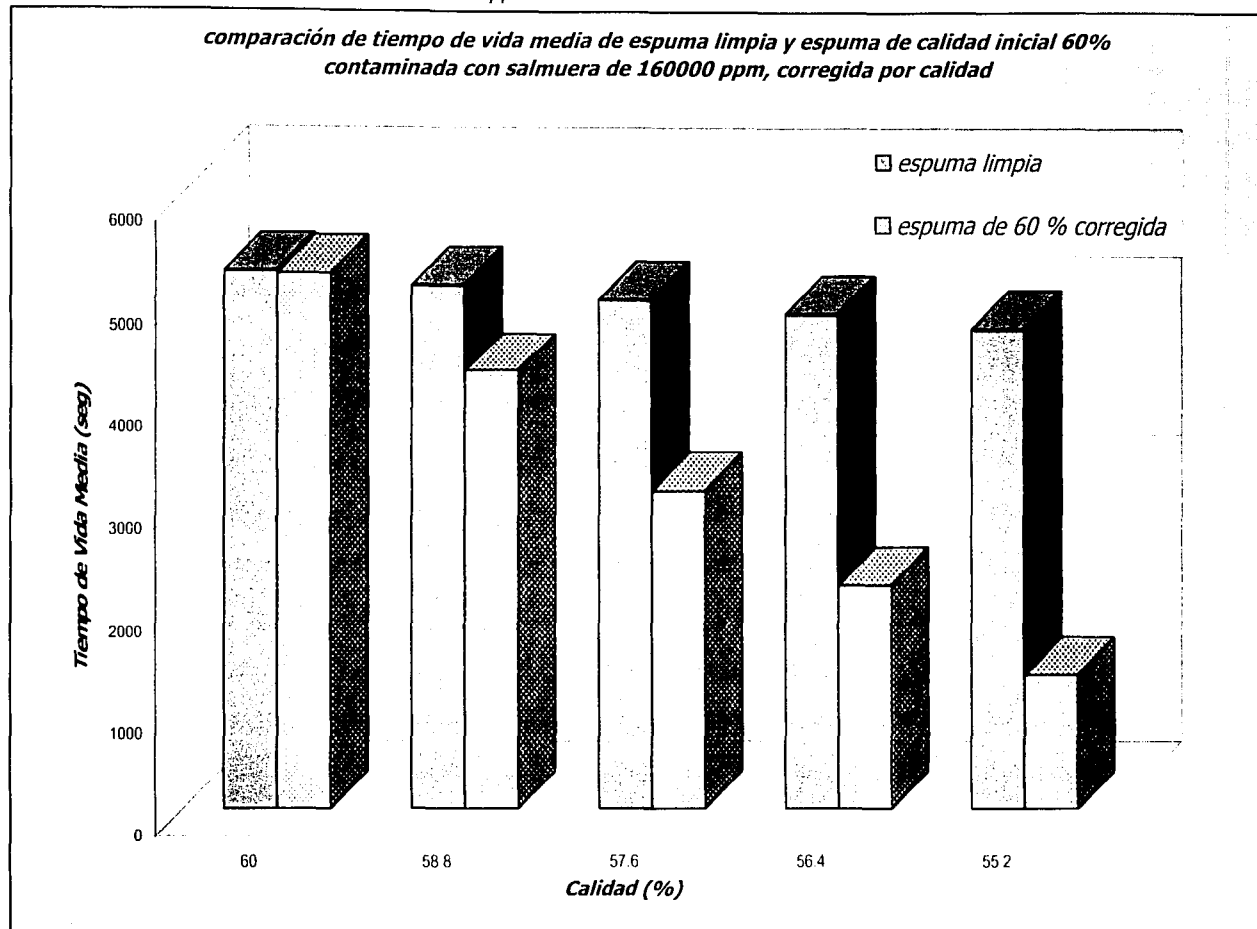
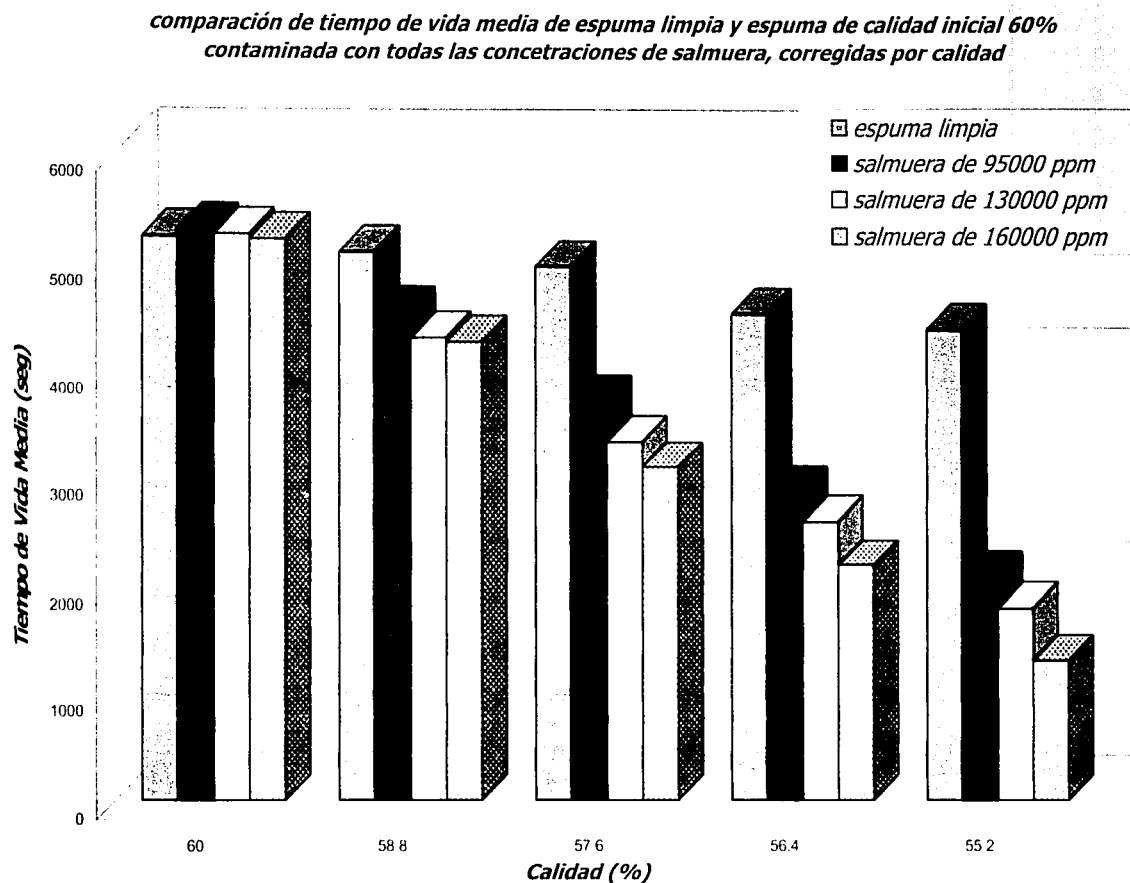


Figura D.4. Comparación de la calidad de una espuma limpia, con una calidad corregida para una espuma de 60% de calidad inicial debido a la contaminación con diferentes concentraciones de salmuera.



3.- Correcciones para una espuma con calidad inicial de 70 por ciento:

Para una contaminación con salmuera de 95000 ppm de concentración de (NaCl).

Corrección de la calidad inicial 70% por contaminación con salmuera de 95000 ppm Tomando como base 100 ml de mezcla entre espuma y contaminante.				
Porcentaje de contaminación	Volumen de Líquido	Volumen de gas	Calidad	Tiempo de Vida Media
% Volumen	ml	ml	% Volumen	Seg.
0	30.0	70	70	6442
2	31.4	68.6	68.6	5457
4	32.8	67.2	67.2	4454
6	34.2	65.8	65.8	3215
8	35.6	64.4	64.4	2277
10	37.0	63	63	1203
15	40.5	59.5	59.5	358
20	44.0	56	56	90
25	47.5	52.5	52.5	56
30	51.0	49	49	20

Tabla D.10. Corrección de la calidad debido a la contaminación con salmuera de 95000 ppm, para una espuma de calidad inicial de 70 %.

Corrección para una contaminación con salmuera de 95000 ppm de concentración de (NaCl).

Corrección de la calidad debido a la contaminación con salmuera de 95000 ppm para Una espuma de 70% de calidad inicial			
Calidad	Tiempo de Vida Media (Segundos)		Variación
(% en Volumen)	Medido	Calculado	(%)
70	6442	6400	0.65
68.6	5457	6239	14.33
67.2	4454	6078	36.46
65.8	3215	5917	84.04
64.4	2277	5756	152.79
63	1203	5595	365.09
59.5	358	5192.5	1,350.42
56	90	4790	5,222.22

Tabla D.11. Corrección y comparación de la calidad debido a la contaminación con salmuera de 95000 ppm, para una espuma de calidad inicial de 70 %.

Gráficamente se tiene:

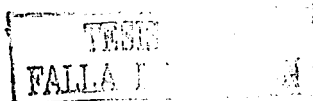
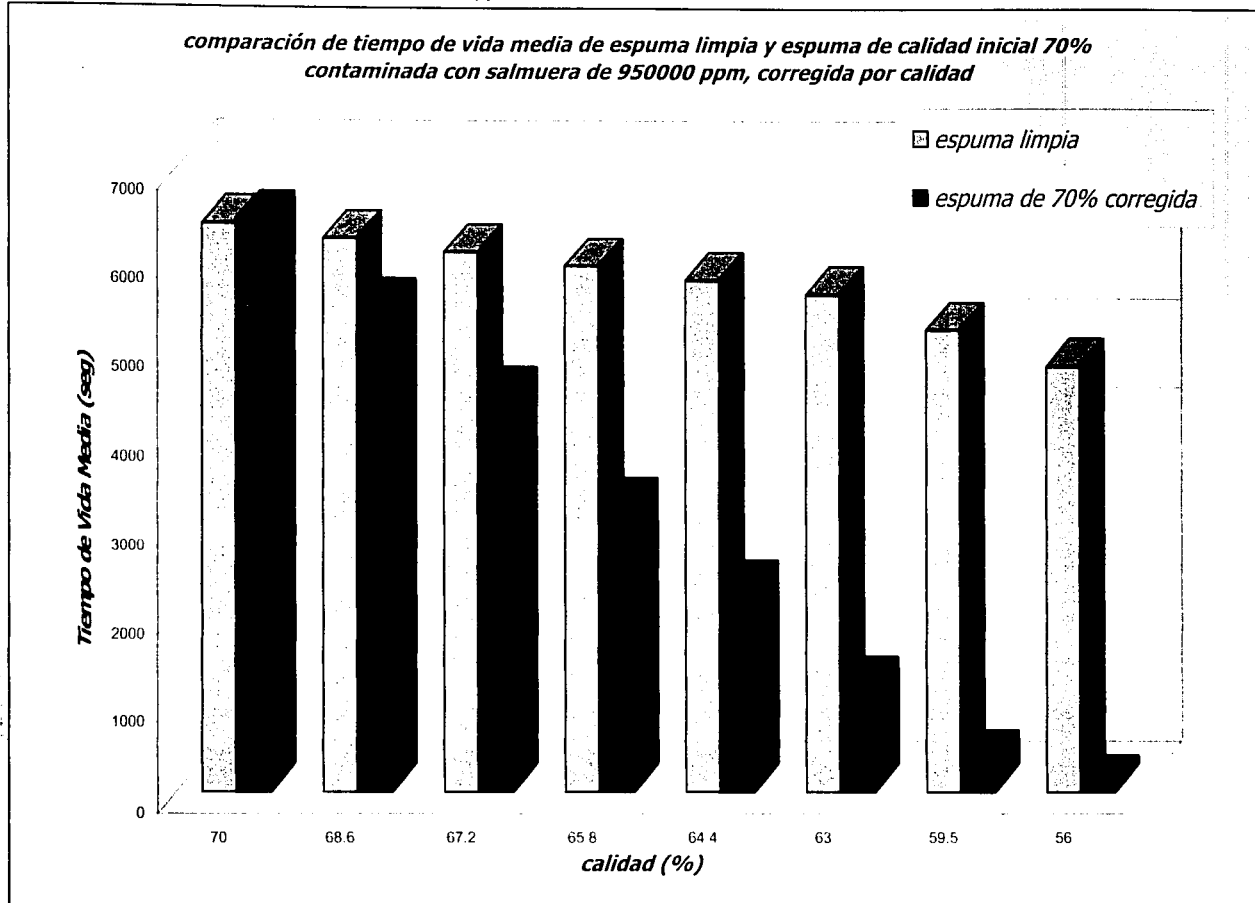


Figura D.5. Comparación de la calidad de una espuma limpia, con una calidad corregida para una espuma de 70% de calidad inicial debido a la contaminación con salmuera de 95000 ppm.



ANEXOS.

Para una contaminación con salmuera de 130000 ppm de concentración de (NaCl).

Corrección de la calidad inicial 70% por contaminación con salmuera de 130000 ppm Tomando como base 100 ml de mezcla entre espuma y contaminante.				
Porcentaje de contaminación	Volumen de Líquido	Volumen de gas	Calidad	Tiempo de Vida Media
% Volumen	ml	ml	% Volumen	Seg.
0	30.0	70	70	6396
2	31.4	68.6	68.6	5290
4	32.8	67.2	67.2	4095
6	34.2	65.8	65.8	2927
8	35.6	64.4	64.4	1943
10	37.0	63	63	757
15	40.5	59.5	59.5	197
20	44.0	56	56	62
25	47.5	52.5	52.5	44
30	51.0	49	49	12

Tabla D.12. Corrección de la calidad debido a la contaminación con salmuera de 130000 ppm, para una espuma de calidad inicial de 70 %.

Corrección para una contaminación con salmuera de 130000 ppm de concentración de (NaCl).

Corrección de la calidad debido a la contaminación con salmuera de 130000 ppm para Una espuma de 70% de calidad inicial			
Calidad	Tiempo de Vida Media (Segundos)		Variación
(% en Volumen)	Medido	Calculado	(%)
70	6396	6400	0.06
68.6	5290	6239	17.94
67.2	4095	6078	48.42
65.8	2927	5917	102.15
64.4	1943	5756	196.24
63	757	5595	639.10
59.5	197	5192.5	2,535.79
56	62	4790	7,625.81

Tabla D.13. Corrección y comparación de la calidad debido a la contaminación con salmuera de 130000 ppm, para una espuma de calidad inicial de 70 %.

Gráficamente se tiene:

Camilo E. Libreros Muñoz.

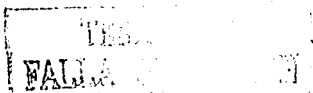
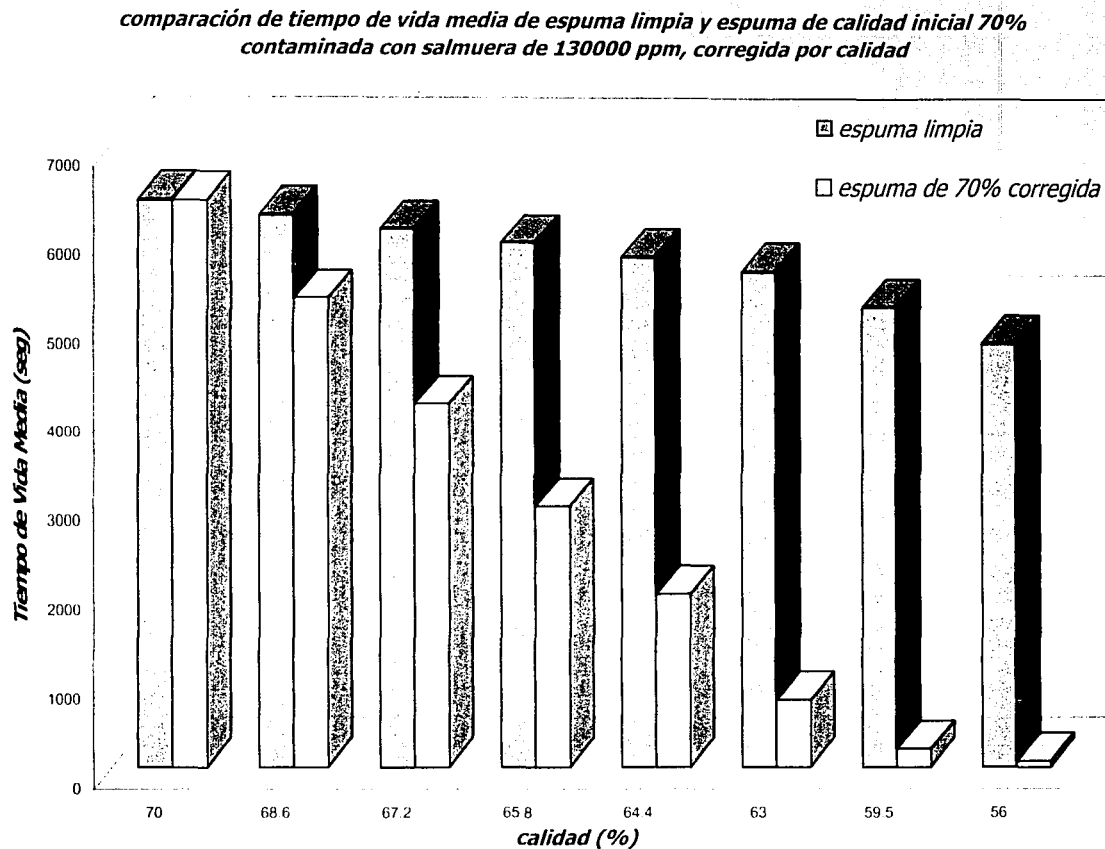


Figura D.6. Comparación de la calidad de una espuma limpia, con una calidad corregida para una espuma de 70% de calidad inicial debido a la contaminación con salmuera de 130000 ppm.



TESIS
FALLA I
GEN

ANEXOS.

Para una contaminación con salmuera de 160000 ppm de concentración de (NaCl).

Corrección de la calidad inicial 70% por contaminación con salmuera de 160000 ppm Tomando como base 100 ml de mezcla entre espuma y contaminante.				
Porcentaje de contaminación	Volumen de Líquido	Volumen de gas	Calidad	Tiempo de Vida Media
% Volumen	ml	ml	% Volumen	Seg.
0	30.0	70	70	6353
2	31.4	68.6	68.6	5000
4	32.8	67.2	67.2	3638
6	34.2	65.8	65.8	2639
8	35.6	64.4	64.4	1542
10	37.0	63	63	391
15	40.5	59.5	59.5	87
20	44.0	56	56	23
25	47.5	52.5	52.5	19
30	51.0	49	49	12

Tabla D.14. Corrección de la calidad debido a la contaminación con salmuera de 160000 ppm, para una espuma de calidad inicial de 70 %.

Corrección para una contaminación con salmuera de 160000 ppm de concentración de (NaCl).

Corrección de la calidad debido a la contaminación con salmuera de 160000 ppm para Una espuma de 70% de calidad inicial			
Calidad	Tiempo de Vida Media (Segundos)		Variación
(% en Volumen)	Medido	Calculado	(%)
70	6353	6400	0.74
68.6	5000	6239	24.78
67.2	3638	6078	67.07
65.8	2639	5917	124.21
64.4	1542	5756	273.28
63	391	5595	1,330.95
59.5	87	5192.5	5,868.39
56	23	4790	20,726.09

Tabla D.15. Corrección y comparación de la calidad debido a la contaminación con salmuera de 160000 ppm, para una espuma de calidad inicial de 70 %.

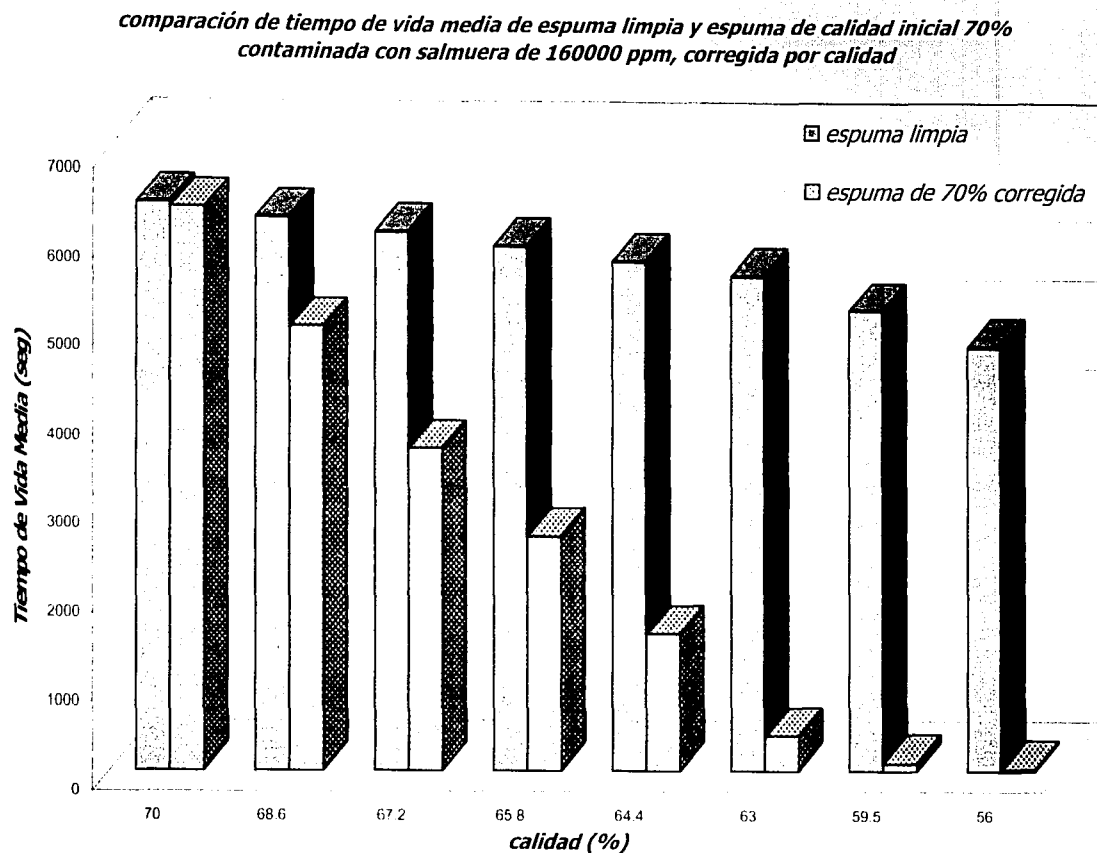
Gráficamente se tiene:

Camilo E. Libreros Muñoz.



D - 14

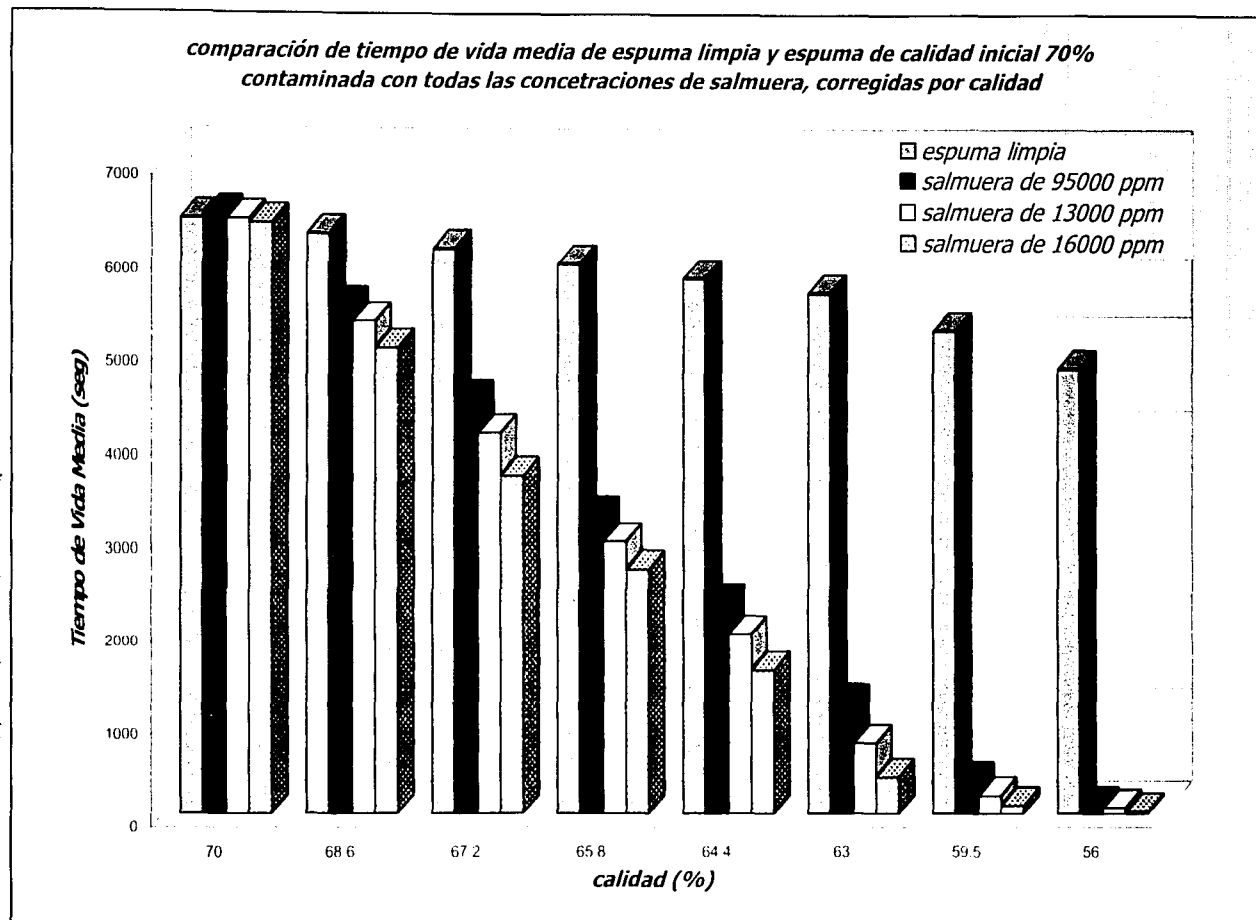
Figura D.7. Comparación de la calidad de una espuma limpia, con una calidad corregida para una espuma de 70% de calidad inicial debido a la contaminación con salmuera de 160000 ppm.



FALLA

EN

Figura D.8. Comparación de la calidad de una espuma limpia, con una calidad corregida para una espuma de 70% de calidad inicial debido a la contaminación con diferentes concentraciones de salmuera.



4.- Correcciones para una espuma con calidad inicial de 80 por ciento:

Para una contaminación con salmuera de 95000 ppm de concentración de (NaCl).

<i>Corrección de la calidad inicial 80% por contaminación con salmuera de 95000 ppm Tomando como base 100 ml de mezcla entre espuma y contaminante.</i>				
Porcentaje de contaminación	Volumen de Líquido	Volumen de gas	Calidad	Tiempo de Vida Media
% Volumen	ml	ml	% Volumen	Seg.
0	20.0	80	80	7520
2	21.6	78.4	78.4	6439
4	23.2	76.8	76.8	5328
6	24.8	75.2	75.2	4043
8	26.4	73.6	73.6	2612
10	28.0	72	72	1224
15	32.0	68	68	139
20	36.0	64	64	63
25	40.0	60	60	41
30	44.0	56	56	19

Tabla D.16. Corrección de la calidad debido a la contaminación con salmuera de 95000 ppm, para una espuma de calidad inicial de 80 %.

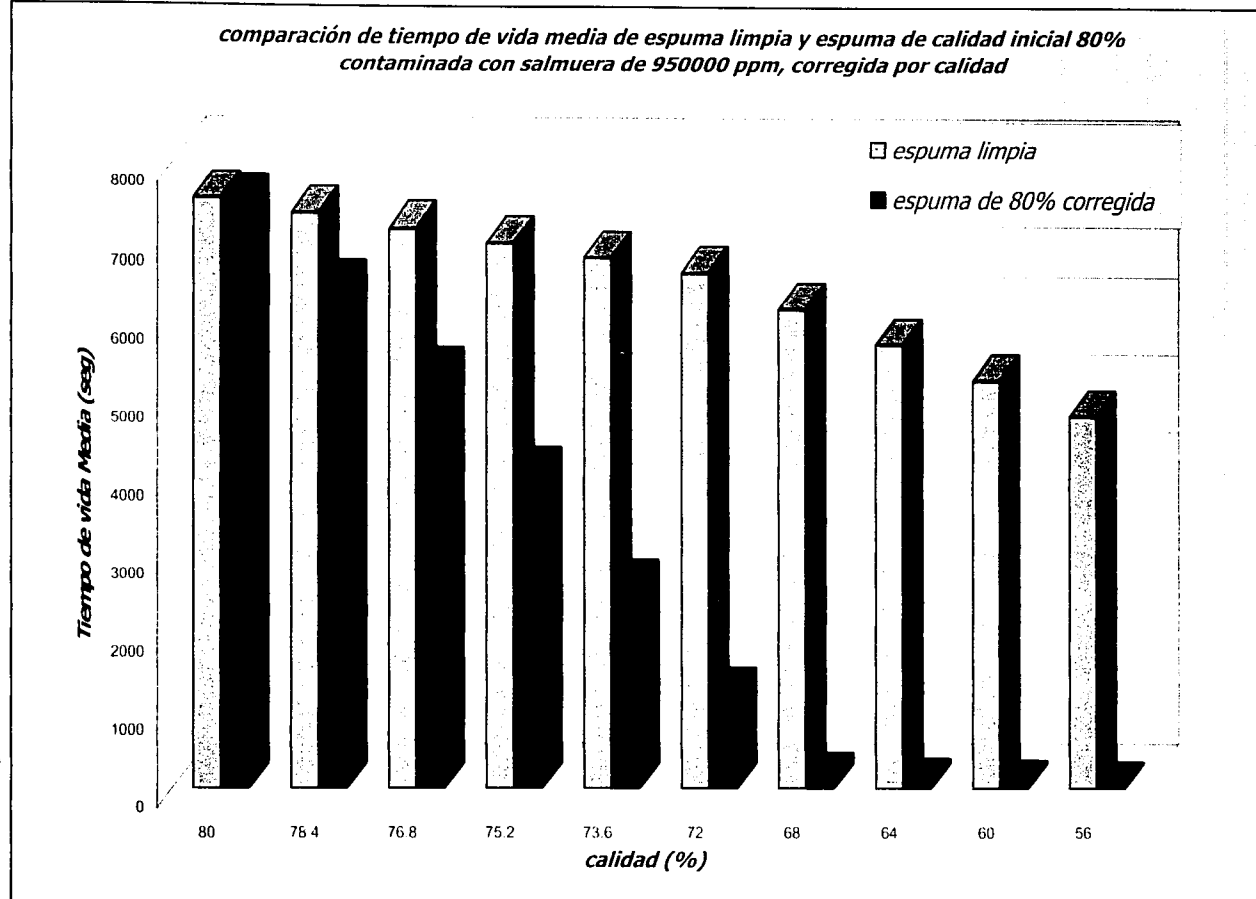
Corrección para una contaminación con salmuera de 95000 ppm de concentración de (NaCl).

<i>Corrección de la calidad debido a la contaminación con salmuera de 95000 ppm para Una espuma de 80% de calidad inicial</i>			
Calidad	Tiempo de Vida Media (Segundos)		Variación
(% en Volumen)	Medido	Calculado	(%)
80	7520	7550	0.40
78.4	6439	7366	14.40
76.8	5328	7182	34.80
75.2	4043	6998	73.09
73.6	2612	6814	160.87
72	1224	6630	441.67
68	139	6170	4,338.85
64	63	5710	8,963.49
60	41	5250	12,704.88
56	19	4790	25,110.53

Tabla D.17. Corrección y comparación de la calidad debido a la contaminación con salmuera de 95000 ppm, para una espuma de calidad inicial de 80 %.

Gráficamente se tiene:

Figura D.9. Comparación de la calidad de una espuma limpia, con una calidad corregida para una espuma de 80% de calidad inicial debido a la contaminación con salmuera de 95000 ppm.



ANEXOS.

Para una contaminación con salmuera de 130000 ppm de concentración de (NaCl).

Corrección de la calidad inicial 80% por contaminación con salmuera de 130000 ppm Tomando como base 100 ml de mezcla entre espuma y contaminante.				
Porcentaje de contaminación	Volumen de Líquido	Volumen de gas	Calidad	Tiempo de Vida Media
% Volumen	ml	ml	% Volumen	Seg.
0	20.0	80	80	7504
2	21.6	78.4	78.4	6295
4	23.2	76.8	76.8	4676
6	24.8	75.2	75.2	3381
8	26.4	73.6	73.6	2050
10	28.0	72	72	773
15	32.0	68	68	163
20	36.0	64	64	41
25	40.0	60	60	15
30	44.0	56	56	2

Tabla D.18. Corrección de la calidad debido a la contaminación con salmuera de 130000 ppm, para una espuma de calidad inicial de 80 %.

Corrección para una contaminación con salmuera de 130000 ppm de concentración de (NaCl).

Corrección de la calidad debido a la contaminación con salmuera de 130000 ppm para Una espuma de 80% de calidad inicial			
Calidad	Tiempo de Vida Media (Segundos)		Variación
(% en Volumen)	Medido	Calculado	(%)
80	7504	7550	0.61
78.4	6295	7366	17.01
76.8	4676	7182	53.59
75.2	3381	6998	106.98
73.6	2050	6814	232.39
72	773	6630	757.70
68	163	6170	3,685.28
64	41	5710	13,826.83
60	15	5250	34,900.00
56	2	4790	239,400.00

Tabla D.19. Corrección y comparación de la calidad debido a la contaminación con salmuera de 130000 ppm, para una espuma de calidad inicial de 80 %.

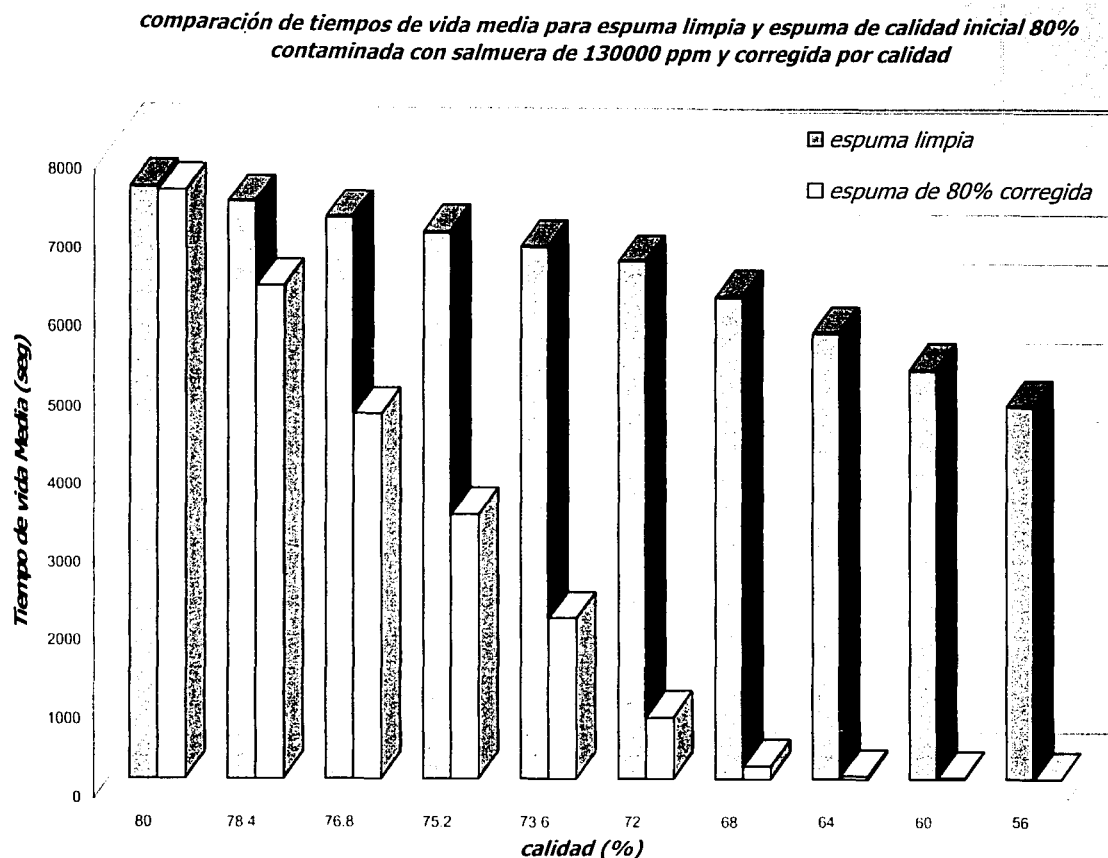
Gráficamente se tiene:

Camilo E. Libreros Muñoz.



D - 19

Figura D.10. Comparación de la calidad de una espuma limpia, con una calidad corregida para una espuma de 80% de calidad inicial debido a la contaminación con salmuera de 130000 ppm.



MAIA DE

ANEXOS.

Para una contaminación con salmuera de 160000 ppm de concentración de (NaCl).

Corrección de la calidad inicial 80% por contaminación con salmuera de 160000 ppm Tomando como base 100 ml de mezcla entre espuma y contaminante.				
Porcentaje de contaminación	Volumen de Líquido	Volumen de gas	Calidad	Tiempo de Vida Media
% Volumen	ml	ml	% Volumen	Seg.
0	20.0	80	80	7518
2	21.6	78.4	78.4	5999
4	23.2	76.8	76.8	4572
6	24.8	75.2	75.2	3090
8	26.4	73.6	73.6	1837
10	28.0	72	72	406
15	32.0	68	68	79
20	36.0	64	64	22
25	40.0	60	60	8
30	44.0	56	56	2

Tabla D.20. Corrección de la calidad debido a la contaminación con salmuera de 160000 ppm, para una espuma de calidad inicial de 80 %.

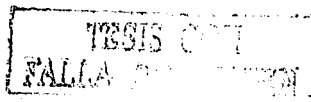
Corrección para una contaminación con salmuera de 160000 ppm de concentración de (NaCl).

Corrección de la calidad debido a la contaminación con salmuera de 160000 ppm para Una espuma de 80% de calidad inicial			
Calidad	Tiempo de Vida Media (Segundos)		Variación
(% en Volumen)	Medido	Calculado	(%)
80	7518	7550	0.43
78.4	5999	7366	22.79
76.8	4572	7182	57.09
75.2	3090	6998	126.47
73.6	1837	6814	270.93
72	406	6630	1,533.00
68	79	6170	7,710.13
64	22	5710	25,854.55
60	8	4743	59,187.50
56	2	4283	214,050.00

Tabla D.21. Corrección y comparación de la calidad debido a la contaminación con salmuera de 160000 ppm, para una espuma de calidad inicial de 80 %.

Gráficamente se tiene:

Camilo E. Libreros Muñoz.



D - 21

Figura D.11. Comparación de la calidad de una espuma limpia, con una calidad corregida para una espuma de 80% de calidad inicial debido a la contaminación con salmuera de 160000 ppm.

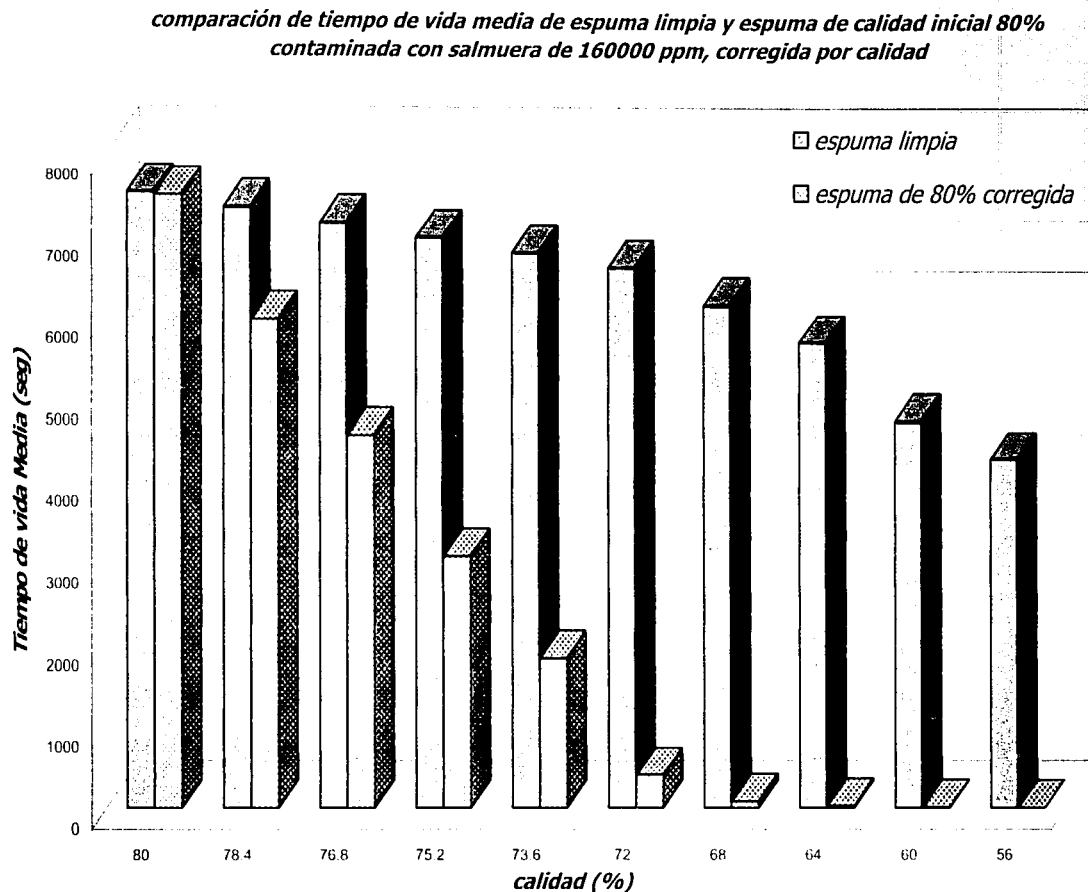
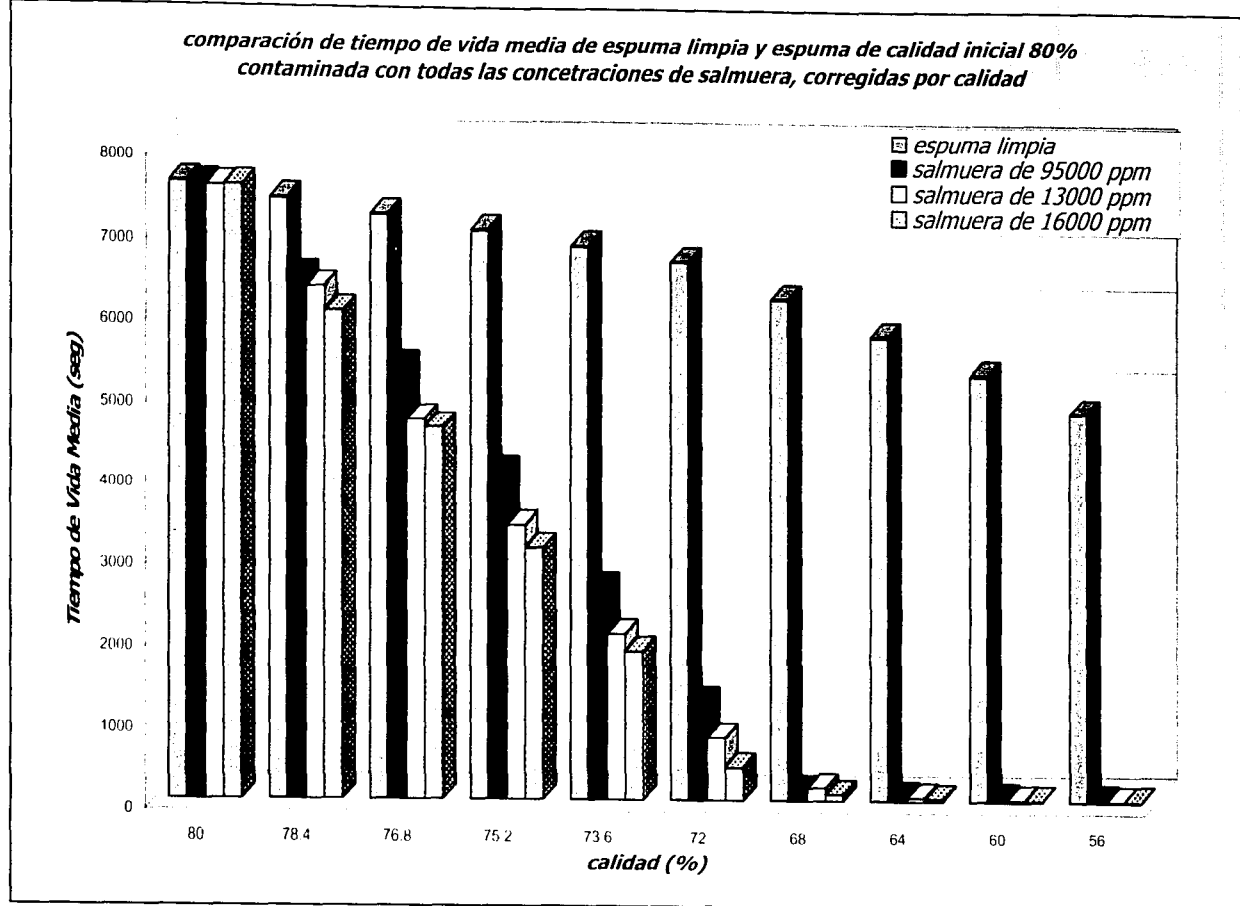


Figura D.12. Comparación de la calidad de una espuma limpia, con una calidad corregida para una espuma de 80% de calidad inicial debido a la contaminación con diferentes concentraciones de salmuera.



5.- Correcciones para una espuma con calidad inicial de 90 por ciento:*Para una contaminación con salmuera de 95000 ppm de concentración de (NaCl).*

*Corrección de la calidad inicial 90% por contaminación con salmuera de 95000 ppm
Tomando como base 100 ml de mezcla entre espuma y contaminante.*

Porcentaje de contaminación	Volumen de Líquido	Volumen de gas	Calidad	Tiempo de Vida Media
% Volumen	ml	ml	% Volumen	Seg.
0	10.0	90	90	5273
2	11.8	88.2	88.2	4389
4	13.6	86.4	86.4	3709
6	15.4	84.6	84.6	2579
8	17.2	82.8	82.8	1821
10	19.0	81	81	1122
15	23.5	76.5	76.5	67
20	28.0	72	72	31
25	32.5	67.5	67.5	18
30	37.0	63	63	10

Tabla D.22. Corrección de la calidad debido a la contaminación con salmuera de 95000 ppm, para una espuma de calidad inicial de 90 %.*Corrección para una contaminación con salmuera de 95000 ppm (NaCl) de concentración.*

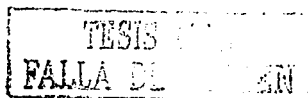
*Corrección de la calidad debido a la contaminación con salmuera de 95000 ppm para
Una espuma de 90% de calidad inicial*

Calidad	Tiempo de Vida Media (Segundos)		Variación
(% en Volumen)	Medido	Calculado	(%)
90	5273	5260	0.25
88.2	4389	5672.2	29.24
86.4	3709	6084.4	64.04
84.6	2579	6496.6	151.90
82.8	1821	6908.8	279.40
81	1122	7321	552.50
76.5	67	7147.5	10,567.91
72	31	6630	21,287.10
67.5	18	6112.5	33,858.33
63	10	5595	55,850.00

Tabla D.23. Corrección y comparación de la calidad debido a la contaminación con salmuera de 95000 ppm, para una espuma de calidad inicial de 90 %.

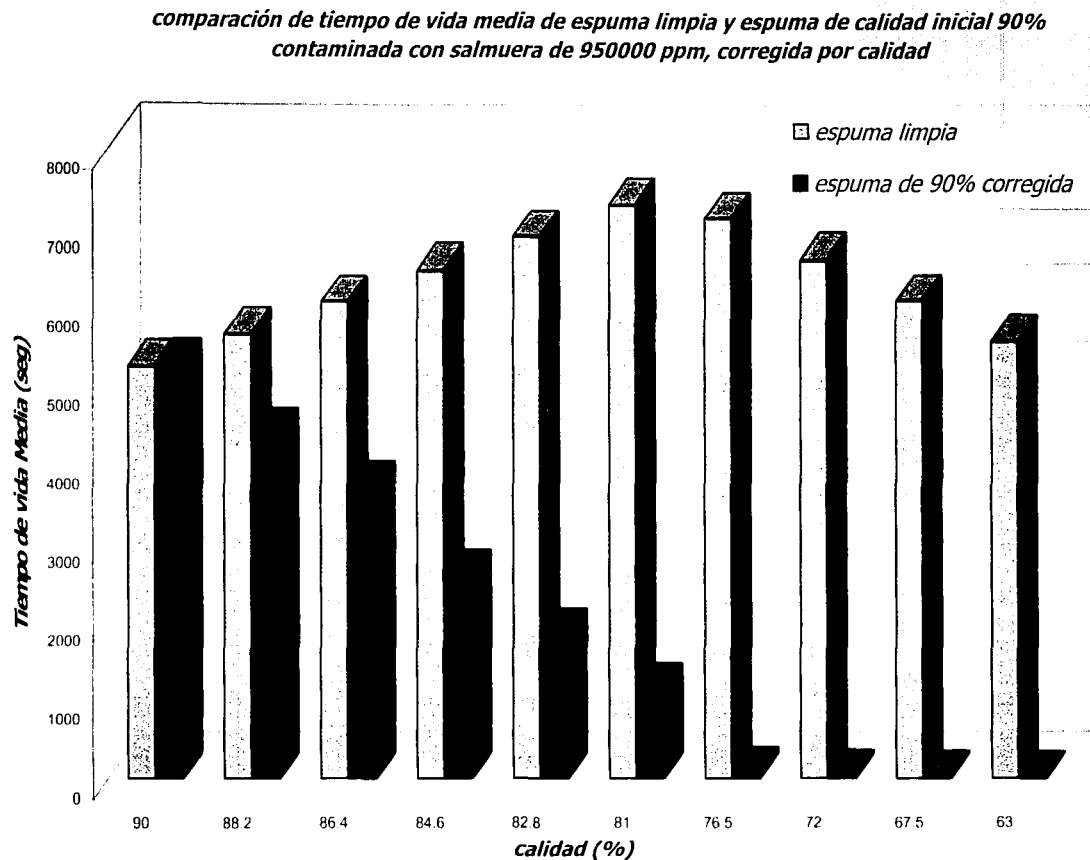
Gráficamente se tiene:

Camilo E. Libreros Muñoz.



D - 24

Figura D.13. Comparación de la calidad de una espuma limpia, con una calidad corregida para una espuma de 90% de calidad inicial debido a la contaminación con salmuera de 95000 ppm.



783
FALIA I.
SN

ANEXOS.

Para una contaminación con salmuera de 130000 ppm de concentración de (NaCl).

Corrección de la calidad inicial 90% por contaminación con salmuera de 130000 ppm Tomando como base 100 ml de mezcla entre espuma y contaminante.				
Porcentaje de contaminación	Volumen de Líquido	Volumen de gas	Calidad	Tiempo de Vida Media
% Volumen	ml	ml	% Volumen	Seg.
0	10.0	90	90	5272
2	11.8	88.2	88.2	4220
4	13.6	86.4	86.4	3342
6	15.4	84.6	84.6	2303
8	17.2	82.8	82.8	1455
10	19.0	81	81	722
15	23.5	76.5	76.5	42
20	28.0	72	72	18
25	32.5	67.5	67.5	11
30	37.0	63	63	1

Tabla D.24. Corrección de la calidad debido a la contaminación con salmuera de 130000 ppm, para una espuma de calidad inicial de 90 %.

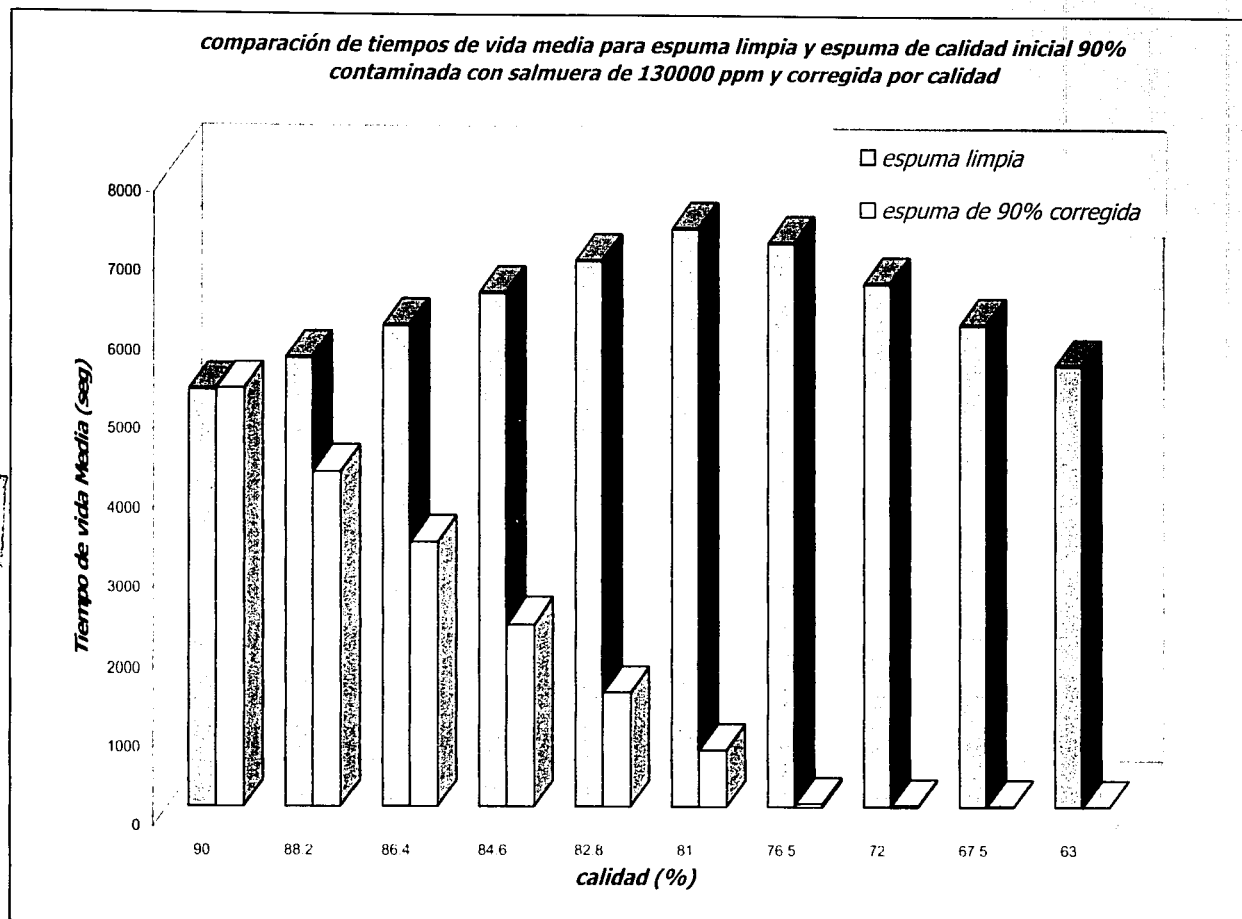
Corrección para una contaminación con salmuera de 130000 ppm de concentración.

Corrección de la calidad debido a la contaminación con salmuera de 130000 ppm para Una espuma de 90% de calidad inicial			
Calidad	Tiempo de Vida Media (Segundos)		Variación
(% en Volumen)	Medido	Calculado	(%)
90	5272	5260	0.23
88.2	4220	5672.2	34.41
86.4	3342	6084.4	82.06
84.6	2303	6496.6	182.09
82.8	1455	6908.8	374.83
81	722	7321	913.99
76.5	42	7147.5	16,917.86
72	18	6630	36,733.33
67.5	11	6112.5	55,468.18
63	1	5595	559,400.00

Tabla D.25. Corrección y comparación de la calidad debido a la contaminación con salmuera de 130000 ppm, para una espuma de calidad inicial de 90 %.

Gráficamente se tiene:

Figura D.14. Comparación de la calidad de una espuma limpia, con una calidad corregida para una espuma de 90% de calidad inicial debido a la contaminación con salmuera de 130000 ppm.



Para una contaminación con salmuera de 160000 ppm de concentración de (NaCl).

Corrección de la calidad inicial 90% por contaminación con salmuera de 160000 ppm
Tomando como base 100 ml de mezcla entre espuma y contaminante.

Porcentaje de contaminación	Volumen de Líquido	Volumen de gas	Calidad	Tiempo de Vida Media
% Volumen	ml	ml	% Volumen	Seg.
0	10.0	90	90	5230
2	11.8	88.2	88.2	3957
4	13.6	86.4	86.4	3024
6	15.4	84.6	84.6	2354
8	17.2	82.8	82.8	1254
10	19.0	81	81	376
15	23.5	76.5	76.5	33
20	28.0	72	72	10
25	32.5	67.5	67.5	8
30	37.0	63	63	3

Tabla D.26. Corrección de la calidad debido a la contaminación con salmuera de 160000 ppm, para una espuma de calidad inicial de 90 %.

Corrección para una contaminación con salmuera de 160000 ppm de concentración de (NaCl).

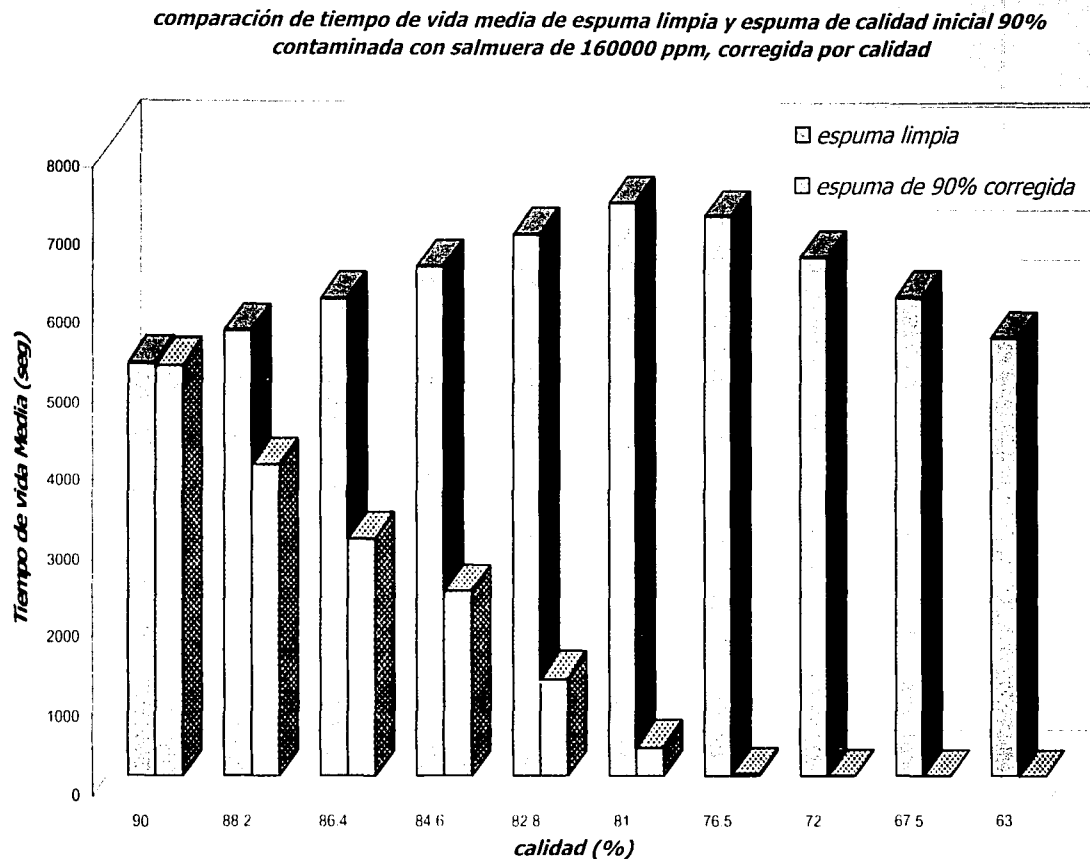
Corrección de la calidad debido a la contaminación con salmuera de 160000 ppm para
Una espuma de 90% de calidad inicial

Calidad (% en Volumen)	Tiempo de Vida Media (Segundos)		Variación (%)
	Medido	Calculado	
90	5230	5260	0.57
88.2	3957	5672.2	43.35
86.4	3024	6084.4	101.20
84.6	2354	6496.6	175.98
82.8	1254	6908.8	450.94
81	376	7321	1,847.07
76.5	33	7147.5	21,559.09
72	10	6630	66,200.00
67.5	8	6112.5	76,306.25
63	3	5595	186,400.00

Tabla D.27. Corrección y comparación de la calidad debido a la contaminación con salmuera de 160000 ppm, para una espuma de calidad inicial de 90 %.

Gráficamente se tiene:

Figura D.15. Comparación de la calidad de una espuma limpia, con una calidad corregida para una espuma de 90% de calidad inicial debido a la contaminación con salmuera de 160000 ppm.



TESIS
FALTA IN
IN

Figura D.16. Comparación de la calidad de una espuma limpia, con una calidad corregida para una espuma de 90% de calidad inicial debido a la contaminación con diferentes concentraciones de salmuera.

