



**UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA DE MINAS**

**ESTUDIO DE COALESCENCIA DE BURBUJAS DURANTE SU FORMACIÓN EN UN
TUBO CAPILAR EN PRESENCIA DE SALES, ESPUMANTES Y SÓLIDOS
MEDIANTE EL USO DE UNA TÉCNICA ACÚSTICA.**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL DE MINAS

HUMBERTO ANDRÉS REBOLLEDO GARNICA

**PROFESOR GUÍA:
WILLY KRACHT GAJARDO**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
GONZALO MONTES ATENAS
HÉCTOR AGUSTO ALEGRÍA**

**SANTIAGO DE CHILE
ABRIL 2013**

RESUMEN EJECUTIVO.

El objetivo principal de este trabajo fue estudiar de manera experimental la coalescencia de burbujas durante su formación en un tubo capilar en presencia de sales, espumantes, mezclas de ambos y partículas sólidas, usando una técnica acústica.

Para ello se monta un arreglo experimental que comprende una celda de acrílico de 5 litros equipada con un tubo capilar (con un diámetro interno de 254 micrones) conectado a un cilindro de aire comprimido. El flujo de aire inyectado a la celda a través del tubo capilar desde el cilindro, se mide y regula con un flujómetro. Las emisiones acústicas generadas durante la formación y coalescencia de burbujas son captadas con un hidrófono. La señal acústica es amplificada y grabada en un computador usando el software de audio Audacity 1.3 beta.

Para cada condición (tipo de agente y concentración), se utiliza la señal acústica para determinar cuál es el máximo flujo de aire que puede ingresar al sistema sin producir coalescencia. El flujo de aire al que se inicia la coalescencia es registrado. El resultado es un gráfico de flujo de aire vs concentración en donde la curva divide la figura en una región de coalescencia y no coalescencia. La construcción de estos gráficos para cada condición probada fue parte importante de este trabajo.

A partir de la técnica implementada y los resultados obtenidos se concluye que los espumantes tienen la capacidad de prevenir la coalescencia en etapas tempranas después de la formación de burbujas. Las sales, por otro lado, presentan un efecto en la prevención de la coalescencia, aunque no tan importante como en el caso de los espumantes. El comportamiento observado en las mezclas de espumantes y mezclas de espumantes y sales, sugiere que los sistemas multicomponentes tienen un efecto positivo en la prevención de la coalescencia. Los resultados obtenidos de las pruebas con partículas sólidas, sugieren que su presencia en el sistema disminuye la prevención de la coalescencia de los espumantes.

ABSTRACT

The goal of this work was to study experimentally the bubble coalescence at formation in a capillary tube in presence of salts, frothers, blends of both and particles, using the acoustic technique.

An experimental set up was assembled. The experimental set-up comprises a 5 Lt. Acrylic tank equipped with a glass capillary tube (ca. 254 μm internal diameter) connected to a compress air cylinder. The gas flow injected in to the tank through the capillary tube, is measured and regulated with a mass flow meter controller. The acoustic emissions of the bubbles formation and bubbles coalescences are captured with the hydrophone. The acoustic signal is amplified and recorded to a computer using the audio software Audacity 1.3 beta.

For each condition (agent type and concentration), the acoustic signal was used to determine what is the maximum gas flow that can be supplied to the system without coalescence. The gas rate at the onset of coalescence is recorded. The result is a plot of concentration versus gas flow rate where the data divide the figure in coalesce and non-coalesce regions. The constructions of this plots for each tested condition was an important part of this work.

In conclusion, the technique was successfully implemented and the results are in agreement with prior observations. Frothers have the capacity to prevent coalescence even at early stages after bubble formation. Salts, on the other hand, show an effect on coalescence prevention, but not as pronounced as frothers. The behavior observed for the frothers blends and salt-frothers blends, suggests that multiple-component-systems have a positive effect on coalescence prevention. The results obtained in tests with particles, shows that the presence of particles in the system decrease frothers bubbles coalescence prevention.

***“A la memoria de mis abuelitos Carmen y Alfredo.
...siempre los recordaré con infinito amor...”***

AGRADECIMIENTOS.

En primer lugar quiero agradecer a mi familia. A mi madre Angélica Garnica por entregarme sin medida su amor, comprensión y apoyo moral en los momentos difíciles. A mi padre José Rebolledo por apoyarme siempre en todo lo que le ha sido posible. A ambos por creer en mí, por ayudarme a crecer y por entregarme los valores y principios que hoy rigen mi actuar y las herramientas para desenvolverme en la vida. A mi hermanita Marcela, por robarme siempre una sonrisa en los momentos de gran agotamiento y cansancio, por quererme de manera incondicional y por tener siempre la mejor disposición para ayudarme.

También quiero agradecer a las personas con quienes encontré la felicidad en esta etapa de mi vida, a mis amigos. Daniela, Valentina, Mary, Naty, Sandra, Pablo, Germán y Danilo, por haber sido mis cable a tierra, por los inolvidables momentos de camaradería y por su sincera amistad, muchas gracias amigos míos. A mis amigos salseros Luiggina, María José, Nicole, Larry, Camilo y Juano, por recordarme que la vida no es solo deberes.

Quiero agradecer sinceramente a Willy Kracht, mi profesor guía, por su valiosa influencia en mi formación profesional, su paciencia, tolerancia, confianza y por su apoyo en el desarrollo de este trabajo.

Agradezco a Juanita Vergara, por su sabia orientación y siempre buena disposición.

También agradezco a los técnicos de los laboratorios de Procesamiento de Minerales e Hidrometalurgia, Oscar Vicencio y Emma María Fonseca, por su buena disposición y ayuda con los aspectos técnicos de la parte experimental de este trabajo.

Finalmente quiero agradecer a CONICYT que a través del proyecto FONDECYT N° 1110173, hizo posible la realización de este trabajo de título.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Motivación del trabajo	1
1.2 Objetivos	3
1.1.1. Objetivo General.....	3
1.1.2. Objetivos Específicos	3
1.3 Alcances	4
2. ANTECEDENTES.....	5
2.1 Generación de burbujas y emisiones acústicas.	5
2.2. Coalescencia de burbujas y emisiones acústicas.	7
2.3 Construcción de las curvas de coalescencia.	12
2.4 Efectos de agentes en la coalescencia tardía de burbujas.	13
3. TRABAJO EXPERIMENTAL.....	16
3.1 Set up experimental.	16
3.2 Consideraciones teóricas y de factibilidad técnica para el diseño del set up.	17
3.2.1 Ubicación del hidrófono.	17
3.2.2 Elección del diámetro interno del capilar	18
3.2.3 Medición de diámetros de burbujas generados por el capilar.....	18
3.1 Metodología experimental.	21
3.3.1 Armado del setup experimental.	21
3.3.2 Mediciones y detección de eventos de coalescencia.	22
3.3.3 Lavado de la celda y componentes.	23
3.4 Reproducibilidad.	23
3.5 Agentes usados en el estudio.	24
3.5.1 Sales.....	24
3.5.2 Alcoholes.	25
3.5.3 Poliglicoles.....	25
3.5.4 Extracto puro concentrado de Quillaja Saponaria.....	25
3.5.5 Partículas de cuarzo.	26
3.5.6 Partículas de concentrado de sulfuros de cobre.....	26
3.6 Campaña experimental.	26
3.6.1 Pruebas con sales.	27
3.6.2 Pruebas con alcoholes y poliglicoles.	28

3.6.3	Pruebas con mezcla de dos alcoholes en proporciones distintas: MIBC y pentanol.	29
3.6.4	Prueba con mezcla de un alcohol y un poliglicol: MIBC y PEG 300.	29
3.6.5	Prueba con mezcla de cloruro de sodio (NaCl) y MIBC.....	30
3.6.6	Pruebas con mezclas de MIBC y partículas sólidas en suspensión, hidrofílicas (cuarzo) e hidrofóbicas (concentrado de sulfuros de cobre).....	31
3.7	Equipos auxiliares.	32
4.	resultados y análisis.....	33
4.1	Pruebas con sales.....	33
4.1.1	Sales que presentan prevención completa.....	36
4.1.2	Sales que presentan prevención parcial y completa de coalescencia.	38
4.2	Pruebas con alcoholes y poliglicoles.....	40
4.3	Pruebas con mezcla de dos alcoholes en proporciones distintas (fracción molar): MIBC y pentanol.	42
4.4	Prueba con mezcla de un alcohol y un poliglicol: MIBC (4 metil 2 pentanol) y PEG 300.....	43
4.5	Prueba con mezcla de cloruro de sodio (NaCl) y MIBC (4 metil 2 pentanol).....	44
4.6	Pruebas con mezclas de MIBC (4 metil 2 pentanol) y partículas sólidas en suspensión, hidrofílicas (cuarzo) e hidrofóbicas (concentrado de sulfuros de cobre).....	45
5.	conclusiones.....	49
6.	referencias.....	52
	ANEXOS.....	55
	ANEXO A: Detalle de mediciones realizadas.....	56

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Secuencia de imágenes (1 ms por cuadro) de la formación de una burbuja en un tubo capilar (Kracht y Finch 2009).....	7
Figura 2: Registro de la emisión acústica generada por la generación de la burbuja fotografiada en la figura 1 (Kracht y Finch 2009).....	8
Figura 3: Secuencia de imágenes de la coalescencia de dos burbujas durante su formación (Kracht y Finch, 2009).	8
Figura 4: Registro de la emisión acústica generada por la generación de la burbuja fotografiada en la figura 3 (coalescencia de dos burbujas en su formación) (Kracht y Finch, 2009).	9
Figura 5: a) Grabación de emisiones acústicas de formación de burbujas sin coalescencia. b) Grabación de emisiones acústicas de burbujas que se forman y coalescen con la burbuja que se genera a continuación de esta (Kracht y Finch, 2009).	10
Figura 6: Gráfico de coalescencia para n-alcoholes (Kracht y Finch, 2009).	11
Figura 7: Gráfico de coalescencia para espumantes (Kracht y Finch, 2009).	11
Figura 8: Esquema de arreglo experimental genérico.....	12
Figura 9: Gráfico esquemático para la construcción de una curva de coalescencia.	13
Figura 10: Gráfico de equivalencia entre NaCl y MIBC en la prevención de la coalescencia (Quinn et al., 2007).	14
Figura 11: Esquema del set up experimental.	16
Figura 12: Burbujas generadas en un tubo capilar de 254 micrones a un flujo de aire de 4,2 sccm.	18
Figura 13: Burbujas generadas en un tubo capilar de 254 micrones con un flujo de aire de 9 sccm.	18
Figura 14: Gráfico de reproducibilidad. Prueba realizada con MIBC.....	24
Figura 15: Gráfico de coalescencia para el NaCl.	34
Figura 16: Mediciones acústicas de formación de burbujas en una solución salina de 0,3 M de NaCl. a) Prevención completa ($Q_g= 5,3$ sccm; b) Prevención parcial ($Q_g= 6,6$ sccm); c) Coalescencia ($Q_g= 8,2$ sccm).	35
Figura 17: Gráfico de coalescencia para sales que sólo presentan prevención completa.....	36
Figura 18: Gráfico de área de prevención de coalescencia para sales que presentan prevención completa.	37
Figura 19: Gráfico de coalescencia para sales que presentan prevención parcial y completa.....	38
Figura 20: Gráfico de área de prevención de coalescencia para sales que presentan prevención completa.	39
Figura 21: Curvas de coalescencia para alcoholes.	41
Figura 22: Gráfico de coalescencia de polietilenglicoles.	42
Figura 23: Gráfico de coalescencia para mezclas de MIBC y Pentanol.	43
Figura 24: Gráfico de coalescencia para mezclas de MIBC y PEG 300.....	44
Figura 25: Gráfico de coalescencia para mezclas de MIBC y NaCl.	45
Figura 26: Curvas de coalescencia para el MIBC en presencia de partículas sólidas hidrofílicas (Q_z) e hidrofóbicas (C_{py}).	46

Figura 27: Curvas de coalescencia para el PEG300 en presencia de partículas sólidas hidrofílicas (Qz) e hidrofóbicas (Cpy)..... 47

ÍNDICE DE TABLAS.

Tabla 1: Componentes del set up experimental.	17
Tabla 2: Cálculo del diámetro de las burbujas generadas por el capilar.	20
Tabla 3: Sales estudiadas.	24
Tabla 4: Lista y detalle de alcoholes estudiados.	25
Tabla 5: Lista y detalle de poliglicoles estudiados.	25
Tabla 6: Concentración molar de sales estudiadas en cada prueba.	27
Tabla 7: Concentraciones de alcoholes usadas para construir las curvas de coalescencia.	28
Tabla 8: Concentraciones de las mezclas y agentes utilizadas para construir las curvas de coalescencia.	29
Tabla 9: Concentraciones de las mezclas de pentanol y PEG 300 utilizadas para construir las curvas.	30
Tabla 10: Concentración de MIBC utilizada para construir las curvas de coalescencia en soluciones de NaCl.	30
Tabla 11: Resumen de sales y su región de prevención de coalescencia.	40
Tabla 12: Mediciones de flujo de aire al que ocurre coalescencia en sales que presentan coalescencia completa.	57
Tabla 13: Mediciones de flujo de aire al que ocurre coalescencia en soluciones con sales que presentan coalescencia esporádica y completa.	58
Tabla 14: Mediciones de flujo de aire al que ocurre coalescencia en soluciones con alcoholes.	59
Tabla 15: Mediciones de flujo de aire al que ocurre coalescencia en soluciones con alcoholes normales.	60
Tabla 16: Mediciones de flujo de aire que producen coalescencia para soluciones de polietilenglicoles.	61
Tabla 17: Mediciones de flujo de aire que producen coalescencia para mezclas en distintas proporciones (fracción molar) de MIBC y Pentanol.	62
Tabla 18: Mediciones de flujo de aire que producen coalescencia para mezclas en distintas proporciones (fracción molar) de MIBC y PEG 300.	63
Tabla 19: Mediciones de flujo de aire que producen coalescencia para soluciones salinas de NaCl con concentración 0,1 y 0,5 M y MIBC.	64
Tabla 20: Mediciones de flujos de aire a los que se produce coalescencia en sistemas trifásicos con sólidos de cuarzo o concentrado de sulfuros de cobre a 1% y 6% de concentración en peso, usando MIBC como espumante.	65
Tabla 21: Mediciones de flujos de aire a los que se produce coalescencia en sistemas trifásicos con partículas hidrofílicas (cuarzo) e hidrofóbicas (concentrado de sulfuros de cobre) a 1% y 6% de concentración en peso, usando PEG 300 como espumante.	66

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Motivación del trabajo

Chile es un país minero, por un lado debido a la importancia sustancial que la actividad minera tiene en el desarrollo económico del país y por otro por constituir una actividad ancestral, desarrollada incluso antes de los albores de la patria, actividad que hoy en día se desarrolla en gran parte del territorio nacional especialmente en el norte del país y que ha llegado a adquirir y desarrollar una cultura propia a lo largo del tiempo.

Nuestro país es el primer productor de cobre, nitratos, yodo y litio; el tercer productor de molibdeno; el cuarto de plata y el décimo quinto de oro (situación que pronto cambiará con la explotación de recursos de nuevos yacimientos de oro como Pascualama) a nivel mundial (Boletín mensual COCHILCO Junio 2011). La mayoría de las exportaciones de cobre que se realizan en el país se hacen con el mineral en forma de concentrados de cobre los que se obtienen mediante concentración por flotación. Es por ello que la flotación resulta un proceso de gran importancia para la industria minera nacional, ya que constituye en la mayoría de los casos, el último eslabón de la cadena de valor entregado en Chile al cobre. A nivel mundial, la flotación como método de concentración de minerales es un proceso ampliamente usado en la industria minera ya que permite separar las partículas según su grado de afinidad con el agua (hidrofobicidad).

El proceso de flotación contempla la presencia e interacción de tres fases dentro de una celda de flotación: los sólidos a separar (mineral de ganga), una fase líquida (el agua utilizada) y una fase gaseosa (burbujas de aire). En este sistema trifásico las partículas hidrofóbicas de mineral se adhieren a las burbujas de aire y son transportadas a la superficie por éstas. De esta manera son recuperadas de la pulpa alimentada al proceso.

Es bien sabido que la dispersión de gas al interior de una celda de flotación, el tamaño de las burbujas y la cantidad de área de interface gas-líquido disponible, tienen una marcada importancia en el desempeño del proceso de flotación (Greet 2010). En particular para un mismo volumen de aire disponible para generar burbujas, el crear burbujas de diámetros pequeños resulta más provechoso para el proceso que generar burbujas de gran tamaño ya que en el primer caso el área superficial de burbujas se maximiza.

No resulta fácil crear burbujas pequeñas en el agua. Es por ello que en muchos casos se hace necesario agregar reactivos al sistema (espumantes) para conseguir buenos resultados. Los espumantes son agentes tenso-activos usados para estabilizar la fase espuma y para evitar la coalescencia de burbujas. La coalescencia de burbujas es el proceso por el cual dos o más burbujas se juntan para generar una de mayor tamaño. Además, se sabe que no solo la presencia de espumantes afecta el tamaño de las burbujas sino que también éste se ve afectado por otros factores como la presencia de sales, de partículas de mineral y por variables operacionales como velocidades de agitación y flujos de gas. A pesar de lo importante que es tener burbujas pequeñas en la flotación, poco es lo que se sabe hoy en día respecto de cómo los espumantes y estos otros factores actúan en la formación de las burbujas. Esto ha sido difícil de estudiar debido a que la coalescencia de burbujas durante su formación ocurre en un par de milisegundos y es necesario detectar los eventos de coalescencia para poder estudiarlos. Es por ello que el objetivo de esta memoria es investigar experimentalmente los factores que afectan la coalescencia de burbujas durante su formación, de esta manera se busca realizar un aporte al conocimiento en un área de gran importancia para la industria minera.

Las investigaciones que se han realizado y los estudios referentes a burbujas en formación han utilizado como técnica para observar estos procesos la grabación o registro por imágenes ya sea utilizando cámaras de video digitales de alta resolución como también por la utilización de fotografía digitales a alta velocidad (Manasseh et. al. 2007; Vasquez et. Al. 2005; Leighton 1990). A pesar de que los métodos resultan efectivos presentan desventajas en cuanto a costos y tiempo. Por un lado está el costo de inversión y de almacenamiento de información ya que para realizar mediciones por un par de horas se necesita una gran cantidad de memoria computacional física disponible para el almacenamiento de las imágenes y videos capturados, además del alto costo de inversión de los equipos digitales de captura de imágenes a alta velocidad. Otra desventaja que presenta la utilización de estas técnicas visuales en el estudio de burbujas en formación, es el tiempo que se necesita para analizar las imágenes y videos obtenidos como resultados de los experimentos, puesto que la coalescencia y la generación de burbujas ocurre en instantes de tiempo a escala de milisegundos.

Como alternativa a estas técnicas y metodologías de investigación surge la opción de usar técnicas acústicas. Cuando una burbuja se genera en un medio acuoso la superficie de la burbuja oscila. Esta oscilación tiene una frecuencia de oscilación propia y la vibración perturba el medio acuoso que rodea a la burbuja permitiendo que esta onda se propague y se pueda percibir finalmente como un sonido. De igual forma la coalescencia de dos o más burbujas producen una vibración (sonido) con una frecuencia característica

(Strasberg 1986). Estas frecuencias son llamadas frecuencias de Minnaert en honor a Marcel Minnaert quien estudió este fenómeno en 1933 y concluyó que la frecuencia característica es inversamente proporcional al radio de la burbuja generada. Estas emisiones acústicas producidas por las burbujas al generarse o coalescer y formar una nueva han sido usadas como medio para monitorear dispersiones de gas en medios acuosos, reacciones químicas; y también en oceanografía para determinar poblaciones de burbujas en el mar y el volumen de gas que ellas contienen (Leighton, 1998, 2004).

En esta investigación se aprovechan las bondades de las mediciones acústicas para estudiar la coalescencia de burbujas, en el momento de su formación, cerca del tubo capilar desde el que se generarán. Las burbujas se producirán mediante la inyección de aire al agua contenida en un acuario a través de un tubo capilar dispuesto en la base de éste. Esta técnica presenta una gran ventaja ya que no es necesario ver lo que está ocurriendo para poder monitorear los eventos de coalescencia, porque cuando las burbujas coalescen o se rompen éstas emiten un pulso de sonido con decaimiento exponencial, como en su formación (Strasberg, 1956), pulso que puede ser captado con un hidrófono. La señal difiere entre ambos casos en la amplitud, ya que en el caso de coalescencia de burbujas se obtiene una amplitud mucho mayor que la que se obtiene cuando se forma una burbuja. Esta técnica fue usada en una investigación previa (Kracht and Finch, 2009) en la que se demostró que diferentes espumantes tienen diferentes curvas de concentración versus prevención de coalescencia. Sin embargo, se desconoce el efecto que otros factores como la presencia de sales, partículas de mineral, mezcla de espumantes, pueden tener en la prevención de la coalescencia, es por ello que se ha decidido abordar estas incógnitas en esta investigación.

1.2 Objetivos

1.1.1. Objetivo General

Estudiar de manera experimental la coalescencia de burbujas durante su formación en un tubo capilar en presencia de espumantes, sales y partículas de mineral.

1.1.2. Objetivos Específicos

Estudiar experimentalmente el efecto que tiene la combinación de espumantes en la prevención de la coalescencia.

Estudiar experimentalmente cómo la presencia de sales afecta la coalescencia.

Estudiar experimentalmente cómo influye la presencia de sales en la prevención de la coalescencia por espumantes.

Observar cómo actúan los espumantes en la prevención de la coalescencia ante la presencia de partículas de mineral.

1.3 Alcances

La investigación se realizó con el fin de estudiar la coalescencia de burbujas durante su formación en un tubo capilar mediante técnicas acústicas. El estudio se llevó a cabo a escala de laboratorio y no contempla pruebas en planta.

2. ANTECEDENTES

2.1 Generación de burbujas y emisiones acústicas.

Existen dos mecanismos por los que las burbujas pueden emitir sonidos durante su formación (Manasseh 2007):

- 1) Cuando un flujo de aire es inyectado en un medio acuoso a través de un tubo conectado a una fuente de gas.
- 2) Cuando las burbujas se crean por el atrapamiento de aire desde una superficie libre.

Para los efectos de esta investigación se abordará el primer caso debido a la naturaleza misma de los experimentos a realizar. En ambos casos la formación de la burbuja genera vibraciones que se interpretan como oscilaciones de su superficie.

La oscilación de una burbuja en el líquido es similar a un movimiento armónico simple (bajas amplitudes de oscilación), en donde la fuerza restitutiva es la elasticidad del gas que encierra la burbuja en su interior. Si se desprecia la tensión superficial y se asume una transferencia de calor despreciable (condición adiabática) supuestos que, según se ha encontrado, son una buena aproximación para burbujas osciladores-libres (Leighton 1997; Vazquez et. al. 2008) incluyendo burbujas de aire de tamaño milimétrico en agua, se puede definir la frecuencia de resonancia de Minnaert:

$$\omega_M = \frac{1}{R_0} \sqrt{\frac{3\gamma p_0}{\rho}} \quad (1)$$

En donde,

- ω_M : Frecuencia de resonancia de Minnaert.
 R_0 : Radio de la burbuja.
 p_0 : Presión del gas al interior de la burbuja.
 ρ : Densidad del agua.
 γ : Índice politrópico (varía entre 1 y 1,4 para condiciones de compresión isoterma o adiabática).

La frecuencia de resonancia lineal para pulsaciones de burbujas (ν_0) es:

$$\nu_0 = \frac{\omega_M}{2\pi} \quad (2)$$

De esta forma y reemplazando se obtiene la frecuencia o pulsaciones de Minnaert:

$$\nu_0 = \frac{1}{2\pi R_0} \sqrt{\frac{3\gamma p_0}{\rho}} \quad (3)$$

Reagrupando todos los términos que son constantes en esta ecuación bajo la constante K se puede observar que la frecuencia de Minnaert es inversamente proporcional al radio de la burbuja.

$$\nu_0 R_0 = K \quad (4)$$

Esta última relación se ha comprobado experimentalmente (Leighton y Walton 1986; Leighton et. al. 1990; Vazquez et. al. 2008; Kracht y Finch 2009) para los estudios de formación de burbujas en un tanque mediante la inyección de aire a través de un tubo capilar.

En este tipo de sistemas, también se ha observado que un aumento en el flujo de aire inyectado produce un aumento en la frecuencia de generación de burbujas, las que ascienden en forma de cadena, una tras otra, desde el capilar hasta la superficie. Este aumento en la frecuencia de generación de burbujas se traduce en un menor tiempo entre la formación de una primera y una segunda burbuja (primaria y secundaria respectivamente), lo que produce una interacción entre ambas.

Según lo documentado por Leighton et. al. (1990) esta interacción entre las burbujas primaria y secundaria puede darse de diferentes maneras, según sea la magnitud del flujo de aire inyectado, generando emisiones acústicas distintas según sea el tipo de interacción. Con un flujo de aire bajo, durante su interacción dos burbujas generan una barrera líquida entre ellas. Si se aumenta el flujo de aire inyectado, también puede ocurrir que esta barrera líquida entre ambas burbujas se rompa, produciéndose la coalescencia de ambas burbujas. Al aumentar aún más el flujo de aire, además de producirse la coalescencia de múltiples burbujas, se producen pequeños rompimientos de las burbujas

formadas por coalescencia, que generan burbujas más pequeñas. En este último caso se habla de un comportamiento caótico en la generación de burbujas (Vazquez et. al. 2008).

Para los efectos de este estudio interesan de manera especial las emisiones acústicas generadas por la coalescencia de una burbuja primaria y una secundaria.

2.2. Coalescencia de burbujas y emisiones acústicas.

Cuando dos burbujas coalescen durante su formación en un tubo capilar emiten una onda sonora de amplitud mayor a la que emite la formación de una de las burbujas involucradas en la coalescencia al despegarse del tubo capilar (Kracht y Finch 2009; Manasseh et. al. 2007).

En las siguientes imágenes se presenta una secuencia de cuadros de una burbuja generándose en un tubo capilar captados con una cámara de alta velocidad y una grabación del sonido emitido por las burbujas.

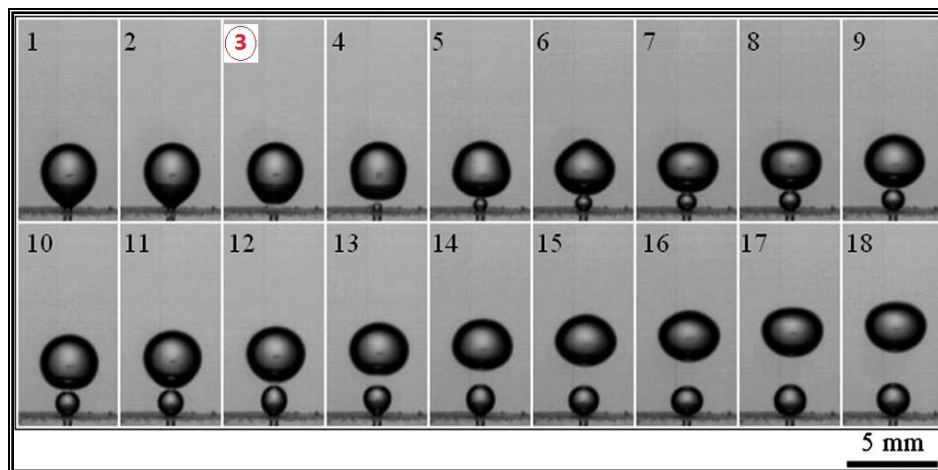


Figura 1: Secuencia de imágenes (1 ms por cuadro) de la formación de una burbuja en un tubo capilar (Kracht y Finch 2009).

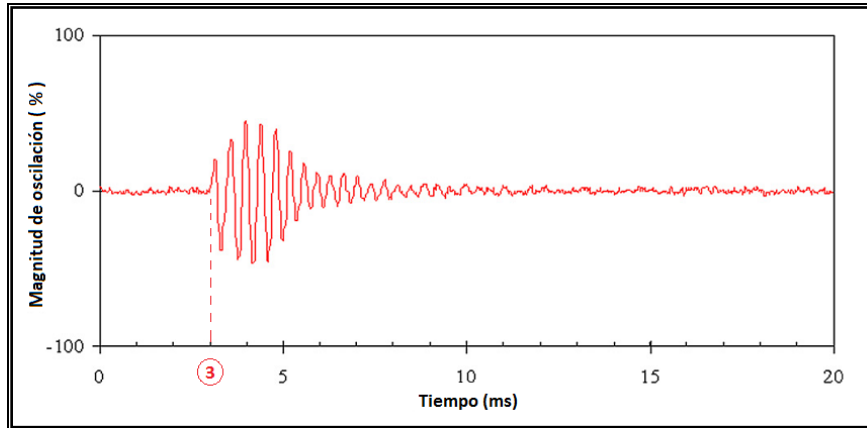


Figura 2: Registro de la emisión acústica generada por la generación de la burbuja fotografiada en la figura 1 (Kracht y Finch 2009).

Tal y como se puede apreciar en las figuras precedentes, cuando la burbuja se genera, separándose del tubo capilar a los 3 ms, produce una emisión acústica debido a la oscilación de la interfase gas-líquido que forma la pared de la burbuja.

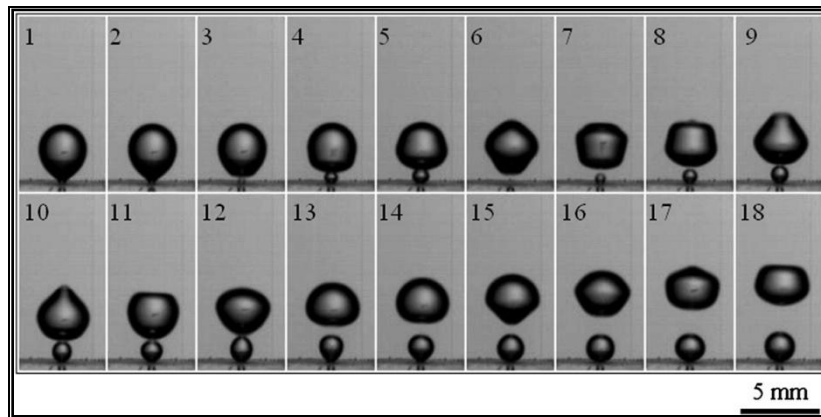


Figura 3: Secuencia de imágenes de la coalescencia de dos burbujas durante su formación (Kracht y Finch, 2009).

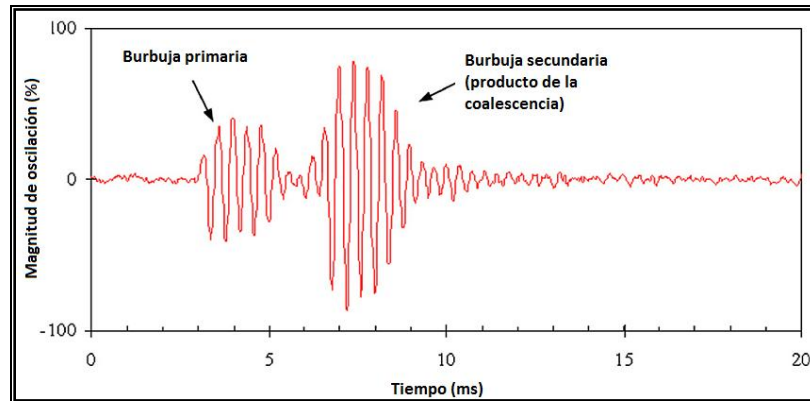


Figura 4: Registro de la emisión acústica generada por la generación de la burbuja fotografiada en la figura 3 (coalescencia de dos burbujas en su formación) (Kracht y Finch, 2009).

En las figuras 3 y 4 se puede observar lo que ocurre al producirse un evento de coalescencia de dos burbujas en su formación. La burbuja primaria se separa del tubo capilar a los 3 ms emitiendo la señal acústica característica, sin embargo a los 6 ms ocurre la coalescencia entre la burbuja primaria y secundaria (segunda burbuja en formación).

En la siguiente figura se presenta parte de una grabación de las emisiones acústicas producidas por burbujas generadas en un tubo capilar con y sin coalescencia.

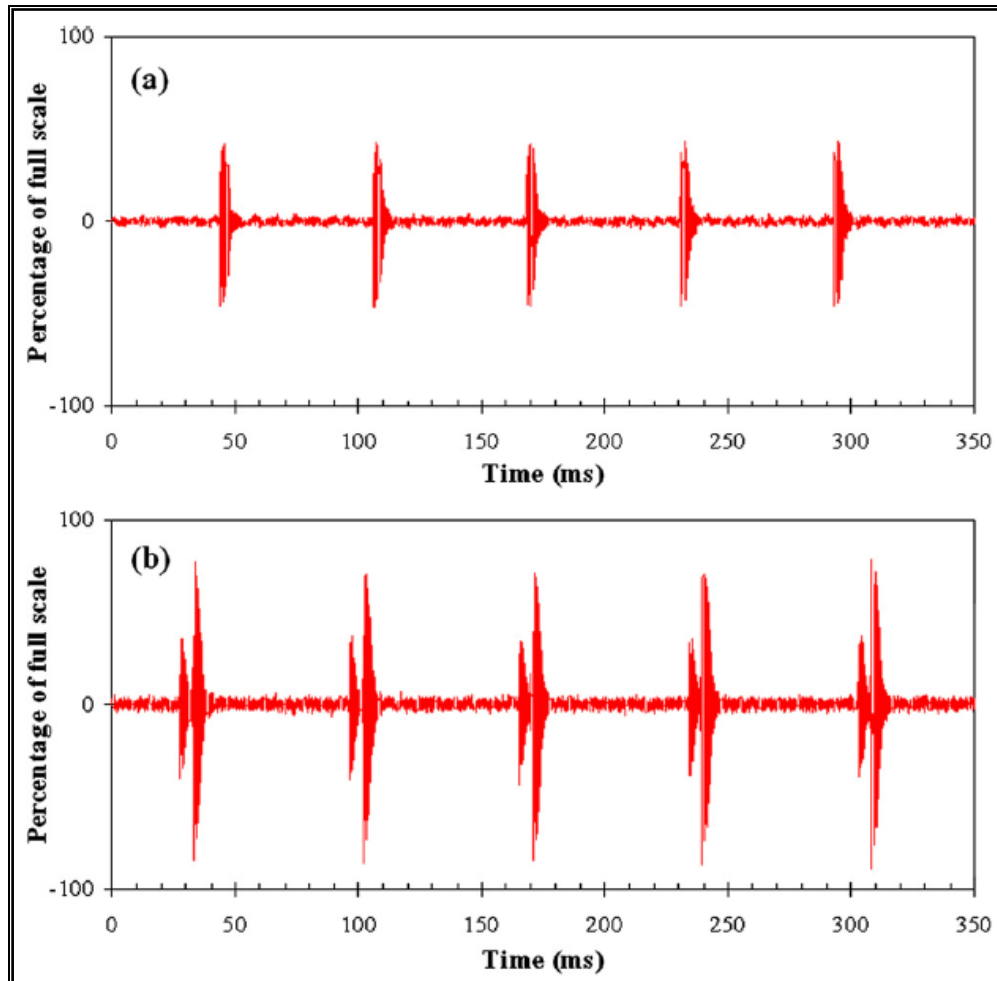


Figura 5: a) Grabación de emisiones acústicas de formación de burbujas sin coalescencia. b) Grabación de emisiones acústicas de burbujas que se forman y coalescen con la burbuja que se genera a continuación de esta (Kracht y Finch, 2009).

Se ha demostrado que diferentes espumantes tienen diferentes curvas de coalescencia (Kracht y Finch, 2009). Esto se puede apreciar en las Figura 6 y Figura 7. Las líneas obtenidas para cada químico en estos gráficos de flujo de aire versus concentración, dividen una zona de no coalescencia (zona inferior) de una región de coalescencia (zona superior).

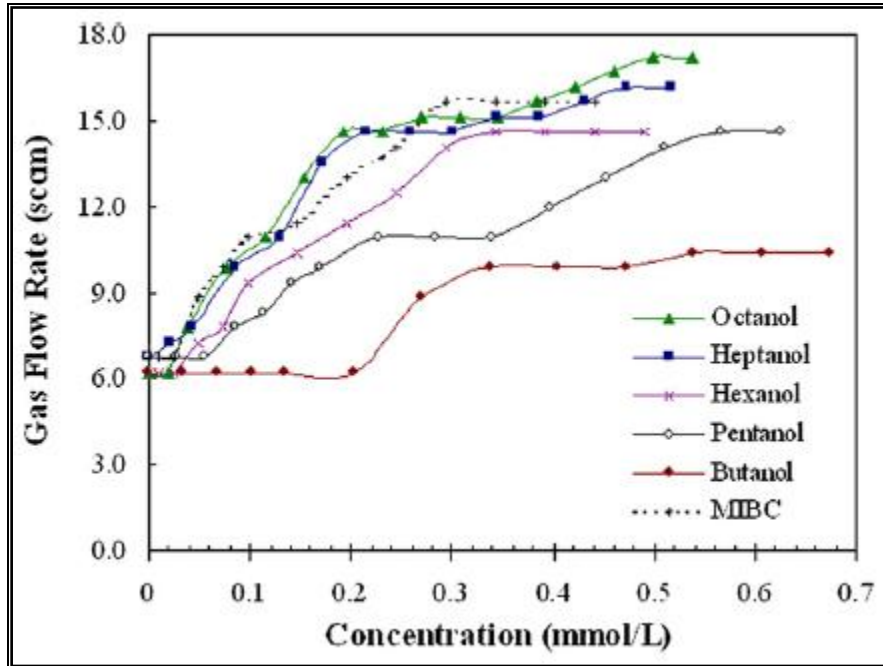


Figura 6: Gráfico de coalescencia para n-alcoholes (Kracht y Finch, 2009).

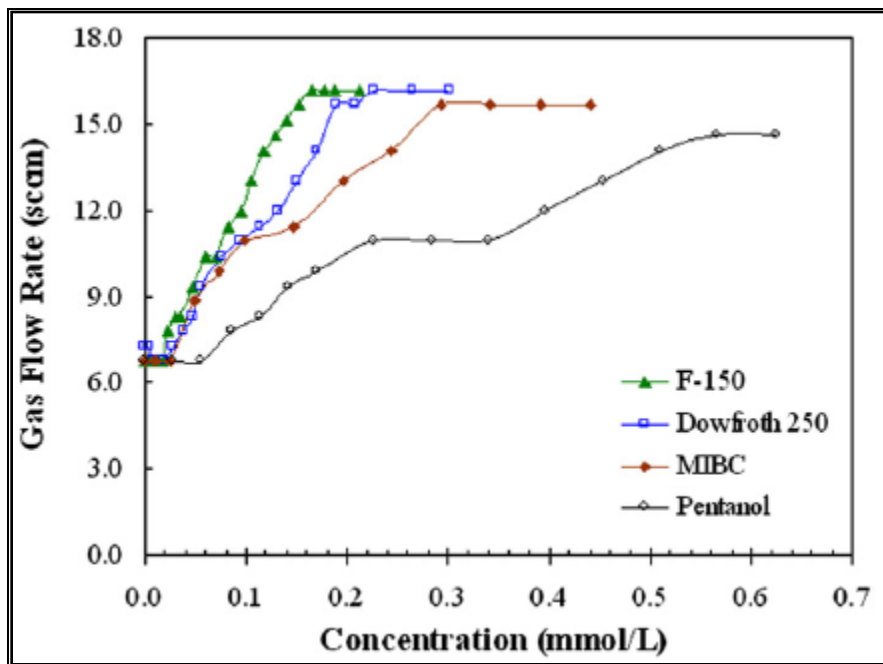


Figura 7: Gráfico de coalescencia para espumantes (Kracht y Finch, 2009).

2.3 Construcción de las curvas de coalescencia.

Para construir las curvas de coalescencia es necesario contar con un arreglo experimental que permita determinar el flujo de aire inyectado al que se comienza a producir la coalescencia para un sistema bifásico o trifásico caracterizado previamente.

Para medir el flujo de aire se han utilizados un flujómetro y para detectar los eventos de coalescencia se han utilizado hidrófonos que permiten captar las emisiones acústicas que producen las burbujas cuando se generan y cuando coalescen.

En la siguiente figura se presenta un esquema simplificado de un *setup* que permite la construcción de curvas de coalescencia.

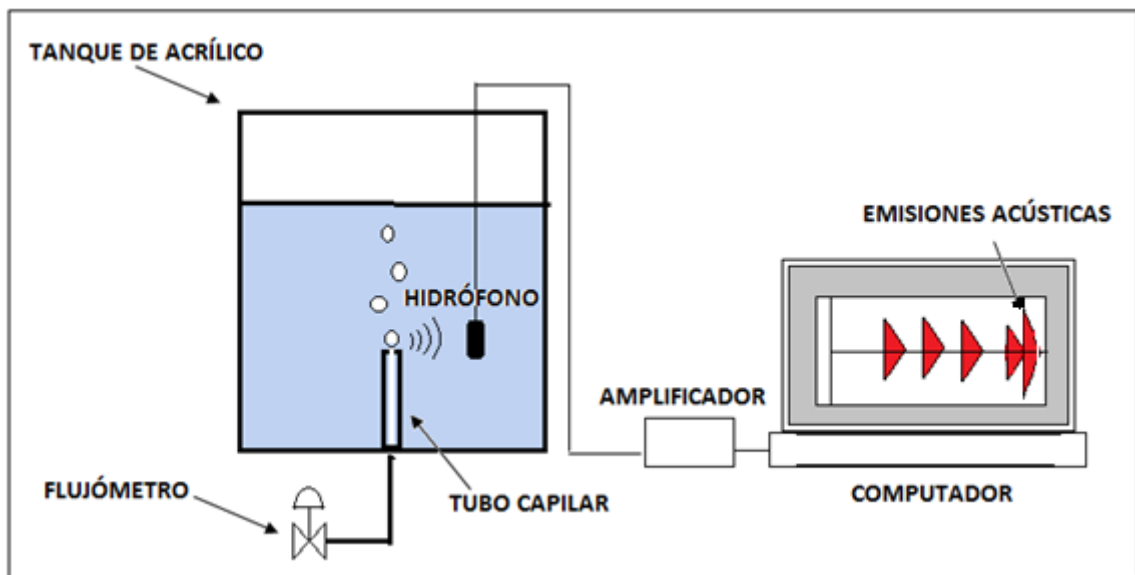


Figura 8: Esquema de arreglo experimental genérico.

Con un arreglo como el presentado en la Figura 8 se pueden construir las curvas de coalescencia tal y como se esquematiza y explica en la siguiente figura.

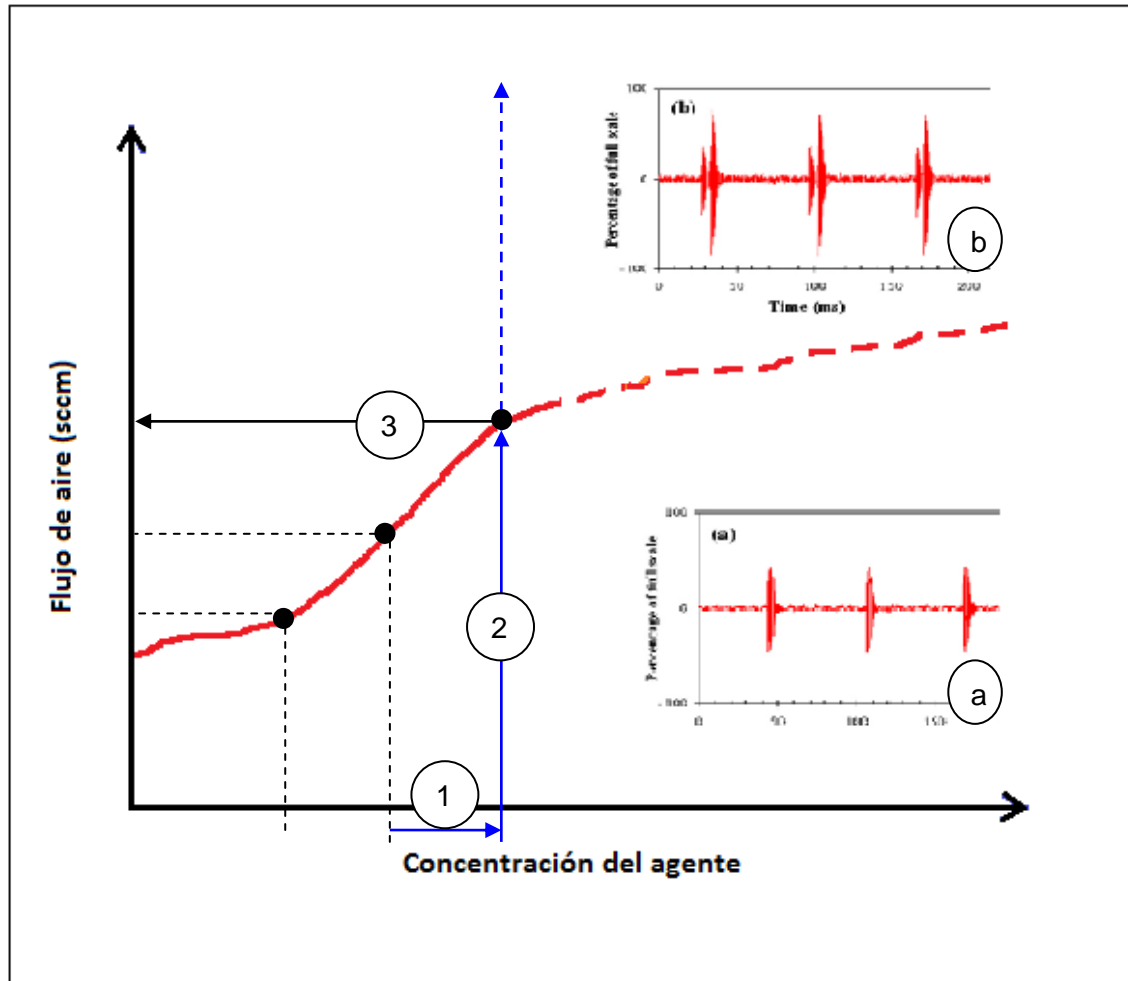


Figura 9: Gráfico esquemático para la construcción de una curva de coalescencia.

Como se aprecia en la Figura 9, en primer lugar se fija la concentración del agente que se quiera en solución (1). Luego se inyecta aire y se aumenta el flujo (2), hasta que por análisis de las emisiones acústicas producidas por las burbujas y captadas por el hidrófono, se identifica el flujo de aire (3) al que las burbujas coalescen. Para flujos de aire mayores al detectado las emisiones acústicas son las generadas cuando dos burbujas coalescen (b), en cambio para flujos de aire menores al detectado la emisión acústica corresponde a la que emite una burbuja al generarse (a).

2.4 Efectos de agentes en la coalescencia tardía de burbujas.

Se han realizado diversas investigaciones que han permitido avanzar en el conocimiento respecto de cómo algunos factores previenen y otros

promueven la coalescencia de burbujas después de que éstas se han formado y muchas veces lejos de su lugar de génesis.

En el caso de los factores que previenen la coalescencia de burbujas en sistemas bifásicos de agua y aire, se ha observado que en moléculas orgánicas disueltas en agua las que mejor previenen la coalescencia son los alcoholes que en cuya estructura poseen una parte hidrofóbica y otra hidrofílica, y que cuanto mayor es la diferencia en hidrofobicidad entre ambas partes, mayor es el efecto en la prevención de la coalescencia (Keitel y Onken, 1982). El caso de los espumantes está bien documentado y se sabe que previenen la coalescencia de burbujas y además dotan de estabilidad a la espuma. Los espumantes actúan retardando el adelgazamiento del film entre burbujas en contacto, previniendo de esta forma la coalescencia.

La presencia de sales en sistemas bifásicos (agua, gas) inhiben la coalescencia de burbujas (Quinn et al., 2007), aunque el mecanismo por el que lo hacen no está claro aún. Este efecto de las sales se puede apreciar en la Figura 10, en donde se observa que una concentración de 0.4 M de NaCl tiene el mismo efecto en el holdup de gas que una concentración de entre 8 a 10 ppm de MIBC, concentración que suele observarse comúnmente en las operaciones de planta (Gelinás et al., 2005).

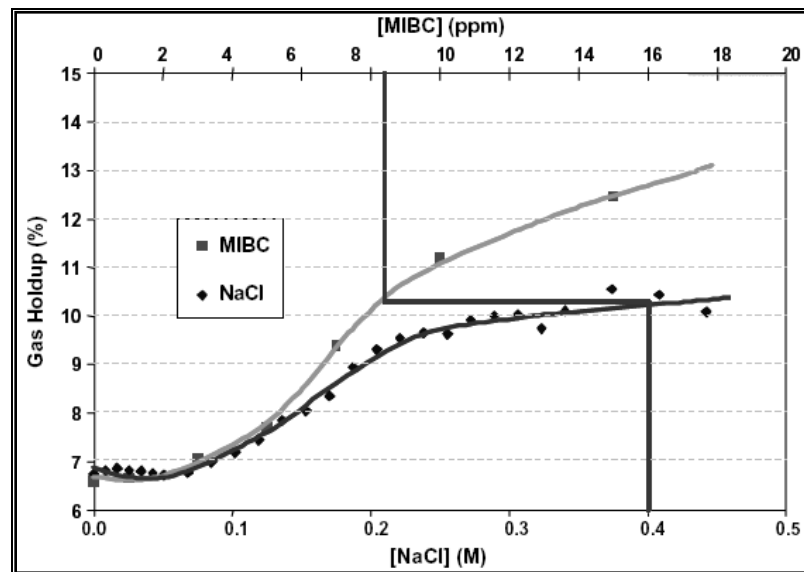


Figura 10: Gráfico de equivalencia entre NaCl y MIBC en la prevención de la coalescencia (Quinn et al., 2007).

El *gas hold up* es una medida de dispersión de aire y mide la fracción de volumen de aire contenida en la fase pulpa de la celda de flotación. En sistemas

trifásicos (agua, gas y sólidos en suspensión) se ha observado que el *gas hold up* decrece ante altas concentraciones de partículas (Banisi et al., 1995; Krishna et al., 1997). Las disminuciones en el *gas hold up* permiten inferir un aumento en la coalescencia de las burbujas. En pruebas con suspensiones de partículas de carbón oxidadas con ácido nítrico para tornarlas hidrofílicas y con partículas de carbón hidrofóbicas, se observó que para carbones menos hidrofóbicos la cantidad de burbujas pequeñas es mayor que para la misma concentración de carbones más hidrofóbicos en la suspensión (Van der Zon et. al., 2002).

3. TRABAJO EXPERIMENTAL.

El trabajo experimental consistió en construir curvas de coalescencia para diferentes agentes y mezclas de estos. Estas curvas permiten analizar el comportamiento del sistema en presencia de los agentes en términos de la prevención de la coalescencia puesto que permiten observar, dada una concentración del agente en la solución, el flujo de aire necesario para que comiencen a ocurrir eventos de coalescencia en el sistema.

Para poder construir las curvas de coalescencia es necesario realizar las siguientes acciones:

- 1) Armado del setup experimental.
- 2) Mediciones y detección de eventos de coalescencia.
- 3) Lavado de la celda y componentes.

3.1 Set up experimental.

Para poder realizar las pruebas y experimentos que permiten el estudio de la coalescencia de burbujas mediante el uso de la técnica acústica, se montó un set up experimental como el que se muestra en la Figura 11, cuyos componentes se especifican en la Tabla 1.

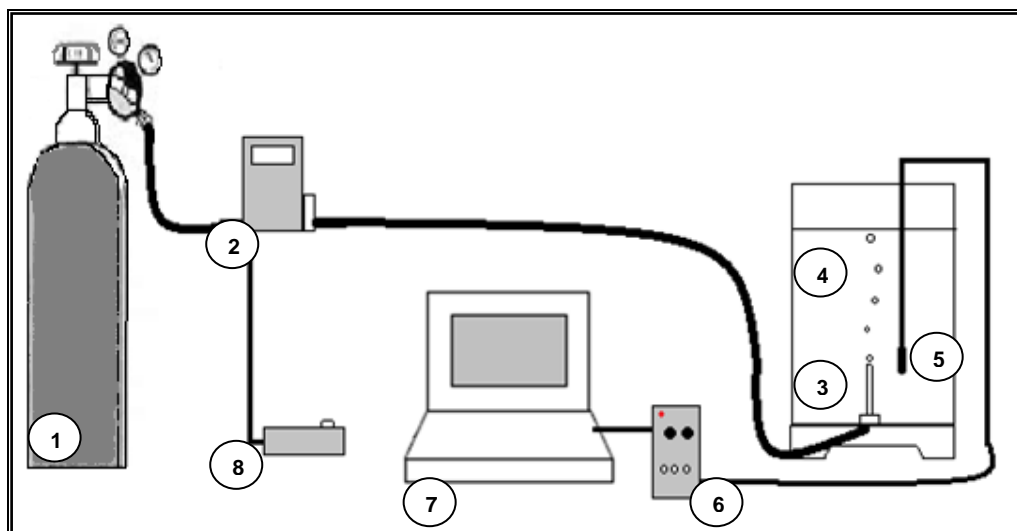


Figura 11: Esquema del set up experimental.

Tabla 1: Componentes del set up experimental.

ID	Descripción	Detalle
1	Cilindro de aire comprimido.	Cilindro de 18 m ³ de aire comprimido, Indura, con regulador de presión Harris de 16 bar de presión de salida.
2	Controlador de flujo.	Omega Modelo FMA 5508, serie FMA 5400/5500, rango de medida (1-100 mL/min).
3	Tubo capilar.	Diámetro interno 254 μm y diámetro externo de 6,4 mm.
4	Celda de acrílico.	Base rectangular de 13,5 x 19,5 cm y 24 cm de alto, con paredes de 9 mm de espesor.
5	Hidrófono.	Tipo 8103 (Brüel & Kjaer).
6	Amplificador de carga	Tipo 2635 (Brüel & Kjaer).
7	Notebook.	Dell, procesador intel core i5- 2,5 GHz; memoria RAM 4 GB.
8	Control remoto del controlador de flujo	

3.2 Consideraciones teóricas y de factibilidad técnica para el diseño del set up.

3.2.1 Ubicación del hidrófono.

Al generarse una burbuja pueden ocurrir reflexiones de la onda sonora en las paredes del estanque y retornar hacia la burbuja desde paredes cercanas en sólo 50 microsegundos. Esto puede influir en la señal y en la dinámica de la burbuja creando un sistema oscilatorio completamente diferente al que se tendría si las paredes estuviesen infinitamente lejos. Este efecto se percibe con fuerza en estanques cilíndricos más que en los de sección cuadrada o rectangular (Manasseh et. al., 2007).

Es recomendable ubicar el hidrófono cerca del tubo capilar ya que la amplitud de la presión acústica decae como r^{-1} , donde r es la distancia [mm] en la horizontal entre el punto en el que se generan las burbujas y el hidrófono (Manasseh et. al., 2007).

3.2.2 Elección del diámetro interno del capilar

Para escoger con qué diámetro de capilar realizar el estudio, se probaron preliminarmente 4 de ellos. Para esto se armó la celda y se llenó con 5 litros de agua destilada. Posteriormente se realizó un barrido de flujo de aire para detectar el punto de coalescencia del agua destilada para cada capilar.

El capilar escogido fue aquel cuyo diámetro permitió que las burbujas se formaran con una diferencia de tiempo entre una y otra que permitiera la detección de la coalescencia a flujos de aire del orden de los 17 sccm. Bajo este criterio, el capilar que mostró un mejor desempeño fue el de 254 micrones.

3.2.3 Medición de diámetros de burbujas generados por el capilar.

Para realizar esta medición se montó el setup y se llenó la celda con 5 litros de agua. Además se diluyeron 10 ppm de MIBC, para formar burbujas más esféricas. Posteriormente con una cámara fotográfica digital Kodak waterproof se tomaron fotografías. Como imagen de referencia se colocó en el mismo plano de formación de las burbujas una regla con error de $\pm 0,05$ cm .

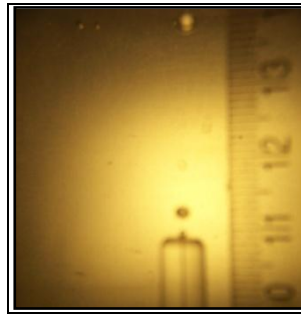


Figura 12: Burbujas generadas en un tubo capilar de 254 micrones a un flujo de aire de 4,2 sccm.

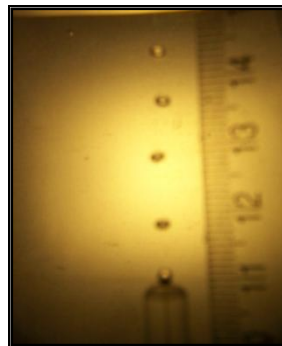


Figura 13: Burbujas generadas en un tubo capilar de 254 micrones con un flujo de aire de 9 sccm.

Se fotografió la formación de burbujas a un flujo de 4,2 sccm y 9 sccm. Durante la captura de imágenes, para cada flujo, se mantuvo la cámara en una posición fija.

En las imágenes obtenidas se pudo apreciar que las burbujas tienen forma esférica en algunas imágenes y esferoidal oblato en la gran mayoría. Por esta razón se decidió tomar dos mediciones de tamaño para cada burbuja: diámetro del eje menor (d_a) y mayor (d_b), para posteriormente calcular un diámetro de burbuja esférica equivalente (d) que cumpla con poseer la misma área proyectada de la burbuja original (esférica).

Se tiene entonces la siguiente relación para el cálculo del tamaño de burbuja en las fotografías captadas:

$$\frac{4\pi}{3}d^3 = \frac{4\pi}{3}d_a d_b^2 \quad (5)$$

En donde se iguala el volumen de una esfera de diámetro d con la de una elipse de diámetros d_a y d_b . De este modo se obtuvo el diámetro d de la esfera que proyecta la misma área que la burbuja generada.

$$d = \sqrt[3]{d_a d_b^2} \quad (6)$$

En cada imagen digital captada los diámetros de los ejes mayores y menores de cada burbuja se midieron en píxeles y se calculó con la ecuación 6 el diámetro de una burbuja esférica equivalente. También se determinó el equivalente en píxeles para una distancia de 20 mm, utilizando para esto la regla de la imagen de referencia de cada fotografía. Finalmente se escaló la medida en píxeles del diámetro de burbuja esférica equivalente a milímetros utilizando una proporción directamente proporcional entre las magnitudes medidas.

Con esta metodología se determinó un diámetro medio de burbuja de 2,65 mm, con una desviación estándar de 0,26 mm, para un total de 17 imágenes analizadas.

En la siguiente tabla se presentan los valores del diámetro y la escala en píxeles y en milímetros para cada burbuja considerada.

Tabla 2: *Cálculo del diámetro de las burbujas generadas por el capilar.*

I.D. Imagen	Escala		Diámetro	
	Pixeles	milímetros	pixeles	milímetros
177	1638	20	204	2,49
178	1569	20	191	2,44
179	1521	20	174	2,29
186	1518	20	227	2,99
187	1510	20	216	2,86
188	1509	20	214	2,84
189	1449	20	208	2,87
199	1451	20	200	2,75
202	1422	20	200	2,81
203	1446	20	181	2,51
204	1435	20	178	2,48
205	1439	20	215	2,99
210	1468	20	210	2,86
211	1460	20	211	2,89
212	1476	20	172	2,34
213	1468	20	156	2,13
214	1467	20	169	2,31
215	1476	20	208	2,82
216	1487	20	196	2,63
Promedio				2,65
Desviación Estándar				0,26

3.1 Metodología experimental.

A continuación se detalla cada uno de los pasos empleados para la construcción de las curvas de coalescencia.

3.3.1 Armado del setup experimental.

- Conectar el tubo capilar a la base de la celda de acrílico, apretando para ello una tuerca swagelok.
- Fijar la manguera de aire que comunica la salida del controlador de flujo con la celda.
- Energizar el controlador de flujo y esperar hasta que alcance la temperatura normal de funcionamiento. Según lo indicado por el fabricante, la temperatura normal de operación se ha alcanzado una vez que el display del controlador de flujo alcanza el valor de 00.0 mL/min.
- Abrir la llave de paso del regulador de presión del cilindro de aire comprimido. Antes de realizar esta acción se verifica que las conexiones entre el cilindro de aire comprimido y el regulador de flujo estén bien conectadas.
- Fijar el *set point* del controlador de flujo en 5 mL/min.
- Una vez fijado el *set point*, se llena la celda con 5 litros de agua para comenzar las pruebas. La mayoría de las pruebas se realizaron con agua potable obtenida de la red que abastece al laboratorio de procesamiento de minerales del Departamento de Ingeniería de Minas de la Universidad de Chile, ubicado en Av. Tupper 2069, Santiago de Chile. Sin embargo, para los set de pruebas de mezcla de NaCl y MIBC; mezcla de partículas de cuarzo y MIBC en agua; y mezcla de sólidos de concentrado de minerales sulfuros de cobre y MIBC en agua, se realizaron con agua destilada almacenada en un contenedor de 50 litros. Para cada uno de estos sets de prueba se utilizó un almacenamiento batch de agua destilada distinto.
- Introducir el hidrófono a la celda y ubicarlo a 1 cm. medido desde el centro del hidrófono al centro del tubo capilar en el plano horizontal.

- Conectar la salida de audio del amplificador de carga a la entrada de micrófono del computador y abrir el *software* de audio audacity 1.3 beta.

3.3.2 Mediciones y detección de eventos de coalescencia.

- Una vez que se ha llenado con 5 litros de agua la celda, y después de verificar que todas las conexiones están en orden, se introducen en la celda el agitador y el sensor de pH. La calibración de este último se realiza de manera estándar antes de cada prueba.

- Se aumenta el flujo de aire inyectado a la celda hasta detectar los eventos de coalescencia de burbujas. Estos eventos se detectan observando la señal acústica que recibe y graba el *software* de audio audacity, puesto que al ocurrir la coalescencia entre una burbuja primaria y una secundaria la amplitud de la señal acústica producida cambia, lo que con el equipo adecuado y un *software* de audio, resulta de fácil observación.

El aumento del flujo de aire se realiza de a 0,1 mL/min, y entre cada aumento se espera un tiempo mínimo de 5 segundos.

- Una vez detectado los eventos de coalescencia del agua, se registra el valor del flujo de aire al cual estos comenzaron a ocurrir.
- Registrado el punto de coalescencia para el agua, se agrega al sistema el agente a estudiar (sal, alcohol, poliglicol, mezclas, etc.) cuya masa o volumen ha sido previamente determinado para posteriormente poder calcular su concentración en la solución.
- Luego de agregar el agente al agua se agita la solución con el *stirrer*. El tiempo durante el cual se realiza la agitación depende de la naturaleza del agente agregado al sistema. Los tiempos de agitación considerados por especie fueron los siguientes:
 - Sales: De 3 a 15 minutos, procurando siempre que se disuelva completamente.
 - Alcoholes y poliglicoles: 3 minutos.
 - Mezcla de alcoholes y poliglicoles: 3 minutos.
 - Mezcla de NaCl y MIBC: 3 minutos.
 - Mezcla de partículas sólidas y MIBC: 5 minutos.
- Una vez transcurrido el tiempo de agitación y disuelto o puesto en suspensión el agente (según sea el caso), se realiza la detección de

eventos de coalescencia variando el flujo de aire. Esto se realiza 3 veces para una misma concentración del agente en la solución. El promedio de estos tres flujos detectados se grafica versus la concentración del agente. De esta forma se construyen las curvas de coalescencia para cada agente.

3.3.3 Lavado de la celda y componentes.

- Una vez finalizadas las mediciones y construidas las curvas para un agente se realiza un minucioso lavado de la celda y de los componentes que tuvieron contacto con el sistema bifásico o trifásico estudiado, como el tubo capilar, el stirrer, el sensor de pH, etc.
- Para ello se desmonta la celda del set up y se lava y enjuaga de 5 a 6 veces con una esponja y abundante agua. No se utilizan otros agentes limpiadores.
- Finalizado el lavado, para el caso de alcoholes, poliglicoles y mezclas de ellos se realizan dos enjuagues de la celda con agua a 90° C. También se realiza este enjuague al stirrer, tubo capilar y tuerca de sujeción del tubo capilar. En ningún caso al sensor de pH. Este último sólo se enjuaga reiteradas veces con agua destilada y posteriormente se seca con papel absorbente. En los casos en que se usaron partículas sólidas (cuarzo y concentrado) se agitó entre medición y medición durante un minuto para mantener en suspensión las partículas y de esta forma evitar cambios bruscos en la concentración en peso de las mismas en la zona alrededor del capilar.

3.4 Reproducibilidad.

Para observar que tan reproducibles serían las pruebas experimentales de este trabajo, se realizó un mismo experimento completo 3 veces. Cada prueba consistió en construir la curva de coalescencia para el MIBC siguiendo el procedimiento experimental descrito en el acápite 3.3.

Los experimentos se realizaron en el laboratorio de procesamiento de minerales de la Universidad de Chile.

En la siguiente figura se presentan los resultados de esta prueba de reproducibilidad. Los puntos azules del gráfico corresponden al promedio de cada medición y las barras rojas son las barras de error que representan la desviación estándar para cada caso.

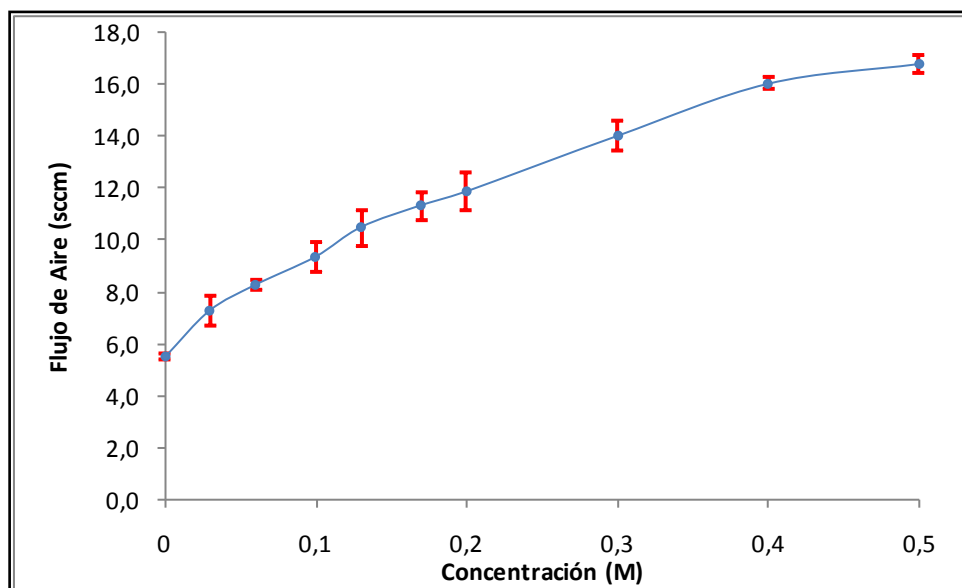


Figura 14: Gráfico de reproducibilidad. Prueba realizada con MIBC.

3.5 Agentes usados en el estudio.

En este estudio se utilizaron como agentes sales, alcoholes, poliglicoles, extracto puro concentrado de quillaja saponaria y partículas sólidas (cuarzo y concentrado de sulfuros de cobre). A continuación, se describen cada uno de ellos.

3.5.1 Sales.

Las sales se obtuvieron por medio del proveedor Merck Ltda. La lista de sales estudiadas y sus propiedades se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 3: Sales estudiadas.

Sal	Fórmula	Peso Molecular (g/mol)	Pureza (%)
Sulfato de zinc eptahidratado	$ZnSO_4 \cdot 7H_2O$	287,54	99,5
Calcio cloruro dihidratado	$CaCl_2 \cdot 2H_2O$	147,02	99,0
Sulfato de cobre pentahidratado	$CuSO_4 \cdot 5H_2O$	249,68	99,0
Cloruro de sodio	NaCl	58,44	> 99,5
Cloruro de potasio	KCl	74,55	> 99,5
Cloruro de magnesio exahidratado	$MgCl_2 \cdot 6H_2O$	203,30	99,0
Cloruro de hierro exahidratado	$FeCl_3 \cdot 6H_2O$	270,33	99,0

En la siguiente tabla se presenta la concentración de cada sal utilizada en las pruebas.

3.5.2 Alcoholes.

Tabla 4: Lista y detalle de alcoholes estudiados.

Alcohol	Fórmula	Peso Molecular (g/mol)	Densidad (g/cm ³)	Pureza (%)
1- Pentanol	C ₅ H ₁₂ O	88,15	0,811	≥ 99
1- Octanol	C ₈ H ₁₈ O	130,23	0,827	≥ 99
1- Heptanol	C ₇ H ₁₆ O	116,2	0,822	≥ 99,4
1- Butanol	C ₄ H ₁₀ O	74,12	0,81	≥ 99,4
1- Propanol	C ₃ H ₈ O	60,1	0,804	≥ 99,5
(S)(+) 4 Metil 2 pentanol	C ₆ H ₁₄ O	102,17	0,802	≥ 99
Cyclohexanol	C ₆ H ₁₂ O	100,16	0,948	≥ 99
Hexyl Alcohol	C ₆ H ₁₄ O	102,17	0,814	≥ 98

3.5.3 Poliglicoles.

Tabla 5: Lista y detalle de poliglicoles estudiados.

Poliglicol	Fórmula	Peso molecular (g/mol)	Densidad (g/cm ³)	Pureza (%)
Dietilen glicol	C ₄ H ₁₀ O ₃	106,12	1,118	99
Etilen glicol	C ₂ H ₆ O ₂	62,07	1,113	99,8
Tetraetilen glicol	C ₈ H ₁₈ O ₅	194,23	1,125	99
A- Terpinol	C ₁₀ H ₁₈ O	154,25	0,93	≥ 96
Polietilen glicol	(C ₂ H ₄ O) _n H ₂ O	400	1,128	-
Polietilen glicol	(C ₂ H ₄ O) _n H ₂ O	300	1,127	-
Polietilen glicol	(C ₂ H ₄ O) _n H ₂ O	200	1,125	-

3.5.4 Extracto puro concentrado de Quillaja Saponaria.

Este extracto líquido corresponde al espumante natural Nature's Foam 200. Posee más de un 30% de saponinas y se comercializa en estado líquido, contenido en envases de plástico de alta densidad, con una concentración de 200 g/L y una densidad de 1,1 g/cm³ de quillaja saponaria.

3.5.5 *Partículas de cuarzo.*

Para estudiar si la presencia de partículas hidrofílicas produce algún efecto en la prevención de la coalescencia, se utilizó cuarzo. Las partículas de cuarzo se pulverizaron para obtener una granulometría bajo malla 400 (bajo 38 micrones) a partir de partículas de cuarzo con una granulometría bajo malla 6. La pulverización se realizó con el fin de poder mantener en suspensión las partículas de cuarzo por más tiempo en la celda, para evitar cambios significativos en la concentración en peso del cuarzo en la suspensión durante las mediciones y variación de flujo de aire.

3.5.6 *Partículas de concentrado de sulfuros de cobre.*

Para estudiar el efecto que produce la presencia de partículas hidrofóbicas respecto de la coalescencia, se utilizó una suspensión de partículas de concentrado de sulfuros de cobre. El concentrado proviene de la faena minera Las Tórtolas y posee una granulometría bajo malla 200 (bajo 75 micrones). Al igual que en las pruebas de cuarzo, para evitar la rápida sedimentación de las partículas y con ello variaciones en el porcentaje en peso de las partículas en la suspensión, se pulverizó el concentrado obteniéndose una granulometría bajo malla 400 (38 micrones). La pulverización además, permite acentuar el grado de hidrofobicidad de estas partículas porque remueve por abrasión las capas de óxido que puedan tener las partículas en su superficie.

3.6 Campaña experimental.

Las pruebas se realizaron en el laboratorio de procesamiento de minerales del Departamento de Ingeniería de Minas de la Universidad de Chile, entre los meses de octubre 2011 y febrero 2012 (primavera 2011 y verano 2012).

Se decidió realizar el estudio de los distintos agentes en el siguiente orden:

- 1) Sales y agua potable.
- 2) Espumantes (alcoholes y poliglicoles) y agua potable.
- 3) Mezcla de alcoholes disueltos en agua potable.
- 4) Mezcla de alcoholes y poliglicoles disueltos en agua potable.
- 5) Mezcla de NaCl y MIBC en agua destilada.
- 6) Mezcla de partículas de cuarzo y MIBC en agua destilada.
- 7) Mezcla de partículas de cuarzo y PEG 300 en agua destilada.
- 8) Mezcla de sólidos de concentrado de minerales sulfuros de cobre y MIBC en agua destilada.

- 9) Mezcla de sólidos de concentrado de minerales sulfuros de cobre y PEG 300 en agua destilada.

3.6.1 Pruebas con sales.

Para construir la curva de coalescencia de cada una de las sales se siguió la metodología antes expuesta. Los aumentos de concentración de sal en la solución se realizaron de forma ordenada, partiendo desde la menor concentración de sal hasta la mayor, en una misma solución. Estos aumentos de concentración se lograron agregando la cantidad de sal necesaria para alcanzar la concentración deseada.

La cantidad de sal agregada por cada punto de la curva de coalescencia se pesó previamente con una balanza electrónica de precisión, de acuerdo a los siguientes pasos:

- Tarar la balanza con el vaso precipitado sobre ella.
- Agregar al vaso precipitado la cantidad de sal necesaria para alcanzar la nueva concentración de sal a estudiar. La sal se agregó con una paleta vibratoria.
- Una vez medida la masa de sal necesaria, se agregó a la solución y luego se agitó.

Para cada aumento de concentración de la sal en solución se siguieron los pasos expuestos en el párrafo precedente.

La concentración molar de cada sal utilizada en estas pruebas para cada punto de la curva se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 6: Concentración molar de sales estudiadas en cada prueba.

Sal	Medición									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Na ₂ CO ₃	0,00	0,02	0,03	0,05	0,07	0,08	0,10	0,12	0,13	0,17
ZnSO ₄	0,00	0,01	0,03	0,04	0,05	0,06	0,08	0,09	0,10	0,11
CuSO ₄	0,00	0,01	0,03	0,04	0,05	0,06	0,08	0,09	0,10	0,11
FeCl ₃	0,00	0,01	0,02	0,03	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08
NaCl	0,00	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,50
KCl	0,00	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,50
CaCl ₂	0,00	0,02	0,03	0,05	0,07	0,08	0,10	0,12	0,13	0,15
MgCl ₂	0,00	0,02	0,03	0,05	0,07	0,08	0,10	0,12	0,13	0,15

3.6.2 Pruebas con alcoholes y poliglicoles.

La construcción de las curvas de coalescencia de los alcoholes y poliglicoles estudiados, se realizó de manera similar a como se hizo con las sales. Como estos agentes se encuentran en estado líquido, para el aumento de concentración en la solución fue necesaria la medición de un volumen del agente bajo estudio. Para ello se utilizaron micropipetas. También se realizó un aumento gradual de la concentración de la solución, agregando diferencias de volumen según haya sido la concentración a estudiar.

Para la construcción de las curvas se utilizaron las siguientes concentraciones de alcoholes y poliglicoles:

Tabla 7: Concentraciones de alcoholes usadas para construir las curvas de coalescencia.

Alcohol	Concentración	Mediciones								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
PENTANOL	mmol	0,03	0,06	0,10	0,13	0,17	0,20	0,29	0,39	0,49
	ppm	2,6	5,2	8,6	11,2	14,7	17,2	25,9	34,6	43,2
OCTANOL	mmol	0,03	0,06	0,10	0,13	0,17	0,20	0,29	0,39	0,49
	ppm	3,8	7,6	12,7	16,6	21,7	25,5	38,3	51,1	63,9
HEPTANOL	mmol	0,03	0,06	0,10	0,13	0,17	0,20	0,30	0,40	0,50
	ppm	3,4	6,9	11,5	15,0	19,5	23,0	34,5	46,0	57,5
BUTANOL	mmol	0,03	0,06	0,10	0,13	0,17	0,20	0,30	0,40	0,50
	ppm	2,2	4,4	7,3	9,5	12,4	14,7	22,0	29,3	36,7
PROPANOL	mmol	0,03	0,06	0,10	0,13	0,17	0,20	0,30	0,40	0,50
	ppm	1,8	3,6	6,0	7,7	10,1	11,9	17,8	23,8	29,8
HEXANOL	mmol	0,03	0,06	0,10	0,13	0,17	0,20	0,30	0,40	0,50
	ppm	3,0	6,1	10,2	13,2	17,4	20,4	30,6	40,8	51,1
CICLO HEXANOL	mmol	0,03	0,06	0,10	0,13	0,17	0,20	0,30	0,40	0,50
	ppm	3,0	6,0	9,9	13,0	17,0	20,0	29,9	40,0	50,0
MIBC	mmol	0,03	0,06	0,10	0,13	0,17	0,20	0,29	0,39	0,49
	ppm	3,0	6,0	10,0	13,0	17,0	20,0	30,0	40,0	50,0
ALFA TERPINEOL	mmol	0,03	0,06	0,10	0,13	0,17	0,20	0,30	0,40	0,50
	ppm	4,2	9,2	15,4	20,1	26,2	30,9	46,3	61,7	77,1
2 ETIL - 1 HEXANOL	mmol	0,03	0,06	0,10	0,13	0,17	0,20	0,30	0,40	0,50
	ppm	3,9	7,8	13,0	16,9	22,2	26,1	39,1	52,1	65,1
4 HIDROXY 4 METIL 2 PENTANOL	mmol	0,03	0,06	0,10	0,13	0,17	0,20	0,30	0,40	0,50
	ppm	3,5	7,0	11,6	15,1	19,7	23,2	34,8	46,5	58,1

3.6.3 Pruebas con mezcla de dos alcoholes en proporciones distintas: MIBC y pentanol.

Se mezclaron 2 alcoholes, MIBC y pentanol, en tres proporciones diferentes (fracción molar): 80% de MIBC y 20% de pentanol; 50% de MIBC y 50% de pentanol; y 20% de MIBC y 80% de pentanol, obteniéndose de esta forma 3 curvas de coalescencia, una para cada muestra.

Para la construcción de cada una se aumentó la concentración de los alcoholes de forma gradual y manteniendo siempre la proporción de la mezcla. En cada aumento de concentración se agregó un volumen de MIBC y uno de pentanol, en la proporción bajo estudio, a la misma solución, con la misma micropipeta pero utilizando puntas diferentes para evitar la contaminación de las soluciones base de MIBC y pentanol.

Se usaron 5 litros de agua potable (primaveral) como solvente de los agentes, uno para cada prueba realizada, lo que suma un total de 15 litros.

La concentración de la mezcla usada por medición para la construcción de las curvas de coalescencia fue la siguiente:

Tabla 8: Concentraciones de las mezclas y agentes utilizadas para construir las curvas de coalescencia.

Alcohol	Concentración	Mediciones								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
PENTANOL + MIBC	mmol	0,03	0,06	0,10	0,13	0,17	0,20	0,29	0,39	0,49

3.6.4 Prueba con mezcla de un alcohol y un poliglicol: MIBC y PEG 300.

Al igual que en el caso de la mezcla de 2 alcoholes, se estudió la prevención de la coalescencia en una mezcla de un alcohol (MIBC) y un poliglicol (PEG 300), disueltos en una solución en diferentes proporciones (fracción molar). Las proporciones estudiadas fueron 80/20, 50/50 y 20/80 de MIBC y PEG 300 respectivamente, por lo que se obtuvieron 3 curvas diferentes, una para cada proporción de los agentes.

La concentración de la mezcla se aumentó de forma gradual, manteniendo la proporción de cada agente en la mezcla. Los volúmenes de alcohol y poliglicol se agregan por separado con la misma micropipeta pero con puntas diferentes, con el fin de evitar la contaminación de los agentes.

En estos experimentos también se utilizó agua potable como solvente, en la misma cantidad que en las pruebas con mezclas de alcoholes. La concentración de las mezclas usadas en estas pruebas fue la misma utilizada para las pruebas de mezclas de alcoholes y se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 9: Concentraciones de las mezclas de pentanol y PEG 300 utilizadas para construir las curvas.

Alcohol	Concentración	Mediciones								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
PENTANOL + PEG 300	mmol	0,03	0,06	0,10	0,13	0,17	0,20	0,29	0,39	0,49

3.6.5 Prueba con mezcla de cloruro de sodio (NaCl) y MIBC.

En estas pruebas se buscó construir la curva de coalescencia para el MIBC, pero en una solución de agua potable y cloruro de sodio. La curva de MIBC se construyó para dos soluciones de distinta concentración, 0,1 M y 0,5 M de cloruro de sodio. Para ello se pesó en una balanza la cantidad de NaCl necesaria para alcanzar la concentración base requerida y luego de agitar la solución durante 5 minutos para poder disolver de buena forma el cloruro de sodio, se comenzó a variar de forma creciente la concentración de MIBC en la solución. El MIBC se agregó con una micropipeta y se agitó durante 1 minuto la solución con el fin de homogenizar la mezcla. Para cada concentración de MIBC se registró el flujo al cual se detectó coalescencia, según se ha descrito en detalle en los párrafos precedentes.

En estas pruebas se utilizaron las siguientes concentraciones de MIBC:

Tabla 10: Concentración de MIBC utilizada para construir las curvas de coalescencia en soluciones de NaCl.

Mezcla	Concentración de MIBC	Mediciones									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0,01 M de NaCl y MIBC	mmol	-	0,03	0,06	0,10	0,13	0,17	0,20	0,30	0,40	0,50
	ppm	-	4,8	9,5	14,3	20,7	27,0	31,8	47,7	63,5	79,4
0,05 M de NaCl y MIBC	mmol	-	0,03	0,06	0,10	0,13	0,17	0,20	0,30	0,40	0,50
	ppm	-	4,8	9,5	14,3	20,7	27,0	31,8	47,7	63,5	79,4

3.6.6 *Pruebas con mezclas de MIBC y partículas sólidas en suspensión, hidrofílicas (cuarzo) e hidrofóbicas (concentrado de sulfuros de cobre).*

Para estudiar los efectos de partículas hidrofóbicas e hidrofílicas en suspensión sobre las burbujas en formación y su coalescencia se crearon suspensiones partículas sólidas hidrofílicas e hidrofóbicas, por separado, en 5 litros de agua destilada para cada escenario. Como medida de la concentración de partículas sólidas en la suspensión se utilizó el porcentaje en peso. Se prepararon suspensiones a diferentes concentraciones en peso de cuarzo y de concentrado de sulfuros de cobre, y sobre cada una se varió la concentración de MIBC. De esta forma se generaron 4 curvas de coalescencia para el MIBC en suspensiones de partículas sólidas, 2 curvas para suspensiones de cuarzo de concentración en peso de 1% y 6%, y 2 curvas para suspensiones de concentrado de sulfuros de cobre de 1% y 6% de porcentaje en peso. La concentración de MIBC en las suspensiones se varió de manera estrictamente creciente de la misma forma en que se ha explicado anteriormente para las pruebas que implican mezclas de agentes. La concentración de MIBC utilizada en estas pruebas es la misma utilizada en las pruebas de mezclas de NaCl con MIBC, indicada en la Tabla 10.

La preparación de las suspensiones de partículas en cambio se realizó de manera distinta, según la metodología que se expone a continuación:

1) Suspensiones de cuarzo (partículas hidrofílicas)

Para crear estas suspensiones en primer lugar se crearon paquetes de cuarzo de 50 gramos aproximados cada uno. De ser puesto en suspensión uno de estos paquetes aumentaría en un 1% el porcentaje de sólidos de la suspensión.

Para crear los paquetes de cuarzo que serían puestos en suspensión, se cortaron 2500 g de cuarzo bajo malla 400, con un cortador rotatorio de 10 divisiones. Posteriormente se agruparon los pares opuestos del cortador y se envasó en una bolsa plástica su contenido para ser pesado. De esta forma se obtuvieron 5 submuestras de 500 g aproximados cada una. Luego se cortaron dos de estas submuestras por separado, para generar 20 submuestras de cuarzo de 50 g en promedio. De esta forma se minimiza el sesgo de muestreo, obteniendo submuestras de cuarzo de características granulométricas similares o con muy poca desviación.

2) Suspensiones de concentrado de sulfuros de cobre (partículas hidrofóbicas).

La metodología para la creación de estas suspensiones es muy similar a las de cuarzo. Se crearon paquetes de 50 g de concentrado que fueron envasados en bolsas plásticas para su posterior uso.

En primer lugar se cortó una muestra de 2500 g de concentrado con granulometría bajo malla 200 (75 micrones). Al igual que con las partículas de cuarzo, se formaron 5 submuestras de 500 g cada una. Posteriormente se pulverizaron por separado durante 5 minutos 2 de estas submuestras, con lo que se obtuvo una granulometría del concentrado bajo malla 400 (33 micrones). Una vez pulverizada, cada submuestra se cortó por separado en un cortador de 10 cortes. Cada corte se envasó en bolsas plásticas y fue pesado en una balanza. Para ello primero se taró la balanza con la bolsa plástica y luego se colocó dentro de la bolsa la submuestra de concentrado, se obtuvo su peso y se selló la bolsa para evitar contaminaciones.

3.7 Equipos auxiliares.

A continuación se presenta una lista de los equipos auxiliares utilizados en el estudio.

- Cortador rotatorio.
- Pulverizador.
- Balanza de precisión.
- Balanzas.
- pH- metro.
- Micropipetas.

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS.

4.1 Pruebas con sales.

En las pruebas con sales se observaron dos comportamientos distintos para dos grupos de sales. El primer grupo conformado por las sales: sulfato de cobre pentahidratado, sulfato de zinc eptahidratado, carbonato de sodio y cloruro de hierro hexahidratado presenta sólo prevención completa de la coalescencia, mientras que el segundo grupo formado por el cloruro de sodio, cloruro de potasio, cloruro de calcio bihidratado y cloruro de magnesio hexahidratado presenta prevención de coalescencia parcial y completa. En las sales que presentan prevención completa de coalescencia se produce la coalescencia a partir de un flujo de aire determinado y para todo flujo mayor a este continúa produciéndose, al punto en que el fenómeno termina tornándose caótico para flujos altos. Sin embargo para el grupo de sales, que presentó prevención parcial, además se observó la existencia de un rango de flujo de aire, al que se produce la coalescencia esporádica de burbujas. La existencia y determinación de este rango de flujo de aire permite la construcción de una nueva curva de coalescencia para las sales de este grupo toda vez que supone la prevención parcial de la coalescencia. Esta nueva curva de prevención parcial, en conjunto con la curva de prevención completa permite la identificación de tres regiones en el gráfico de coalescencia para una sal que presente este comportamiento de prevención de coalescencia mixto (parcial y completa), estas son:

- Región de coalescencia (coalescencia continua).
- Región de prevención parcial (coalescencia esporádica).
- Región de prevención completa (no coalescencia).

Esto concuerda con lo presentado por Kracht y Finch (2009) y se puede apreciar con más claridad en la siguiente figura:

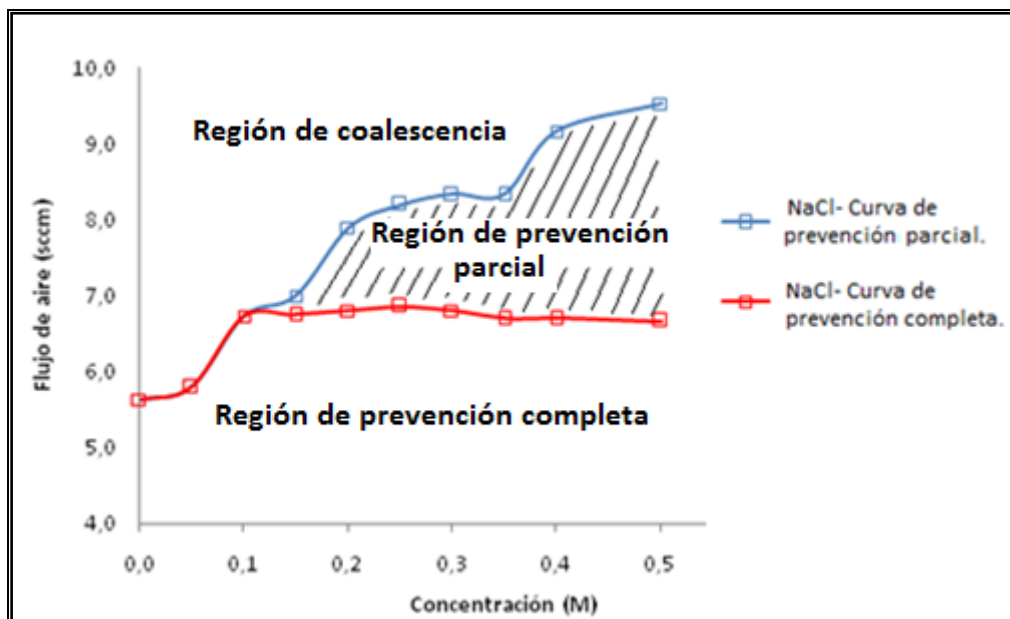


Figura 15: Gráfico de coalescencia para el NaCl.

La identificación de las regiones de coalescencia, de prevención parcial y de prevención completa de la coalescencia se realizó a través del análisis de la información acústica captada por el hidrófono y procesada por el programa Audacity 1.3 beta.

En la siguiente figura se presentan los tres tipos de visualización de las emisiones acústicas mostradas por el programa para cada uno de los tipos de prevención de la coalescencia. Las imágenes se obtuvieron de las pruebas realizadas con NaCl (Figura 15), en particular de las mediciones acústicas realizadas para una solución 0,3 molar de NaCl y agua potable. El eje vertical presenta la intensidad de la señal acústica y el eje horizontal el tiempo en segundos.

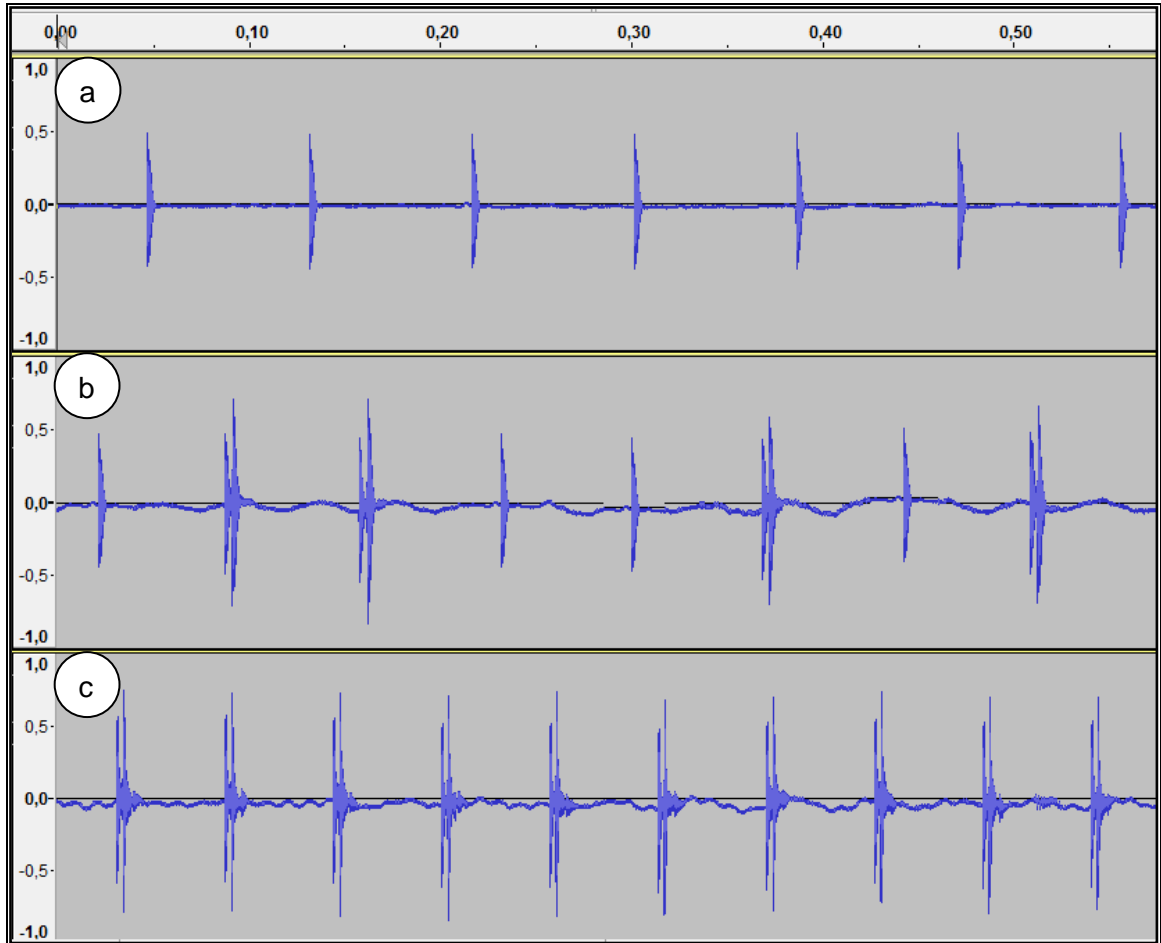


Figura 16: Mediciones acústicas de formación de burbujas en una solución salina de 0,3 M de NaCl. a) Prevención completa ($Q_g = 5,3$ sccm); b) Prevención parcial ($Q_g = 6,6$ sccm); c) Coalescencia ($Q_g = 8,2$ sccm).

4.1.1 Sales que presentan prevención completa.

Para las siguientes sales se observó una curva bien definida de prevención de coalescencia:

- Sulfato de Cobre pentahidratado
- Sulfato de zinc eptahidratado
- Carbonato de sodio.
- Cloruro de hierro exahidratado.

En las pruebas con carbonato de sodio se observaron precipitados de la sal en la celda. Además esta sal presenta prevención parcial para cuatro concentraciones distintas según se aprecia más adelante en la Figura 17. Para las demás sales no se observaron precipitados, sólo una solución traslúcida y cristalina en todo momento.

En la siguiente ilustración se presenta el gráfico de coalescencia para este grupo particular de sales. Este gráfico no fue construido a pH constante.

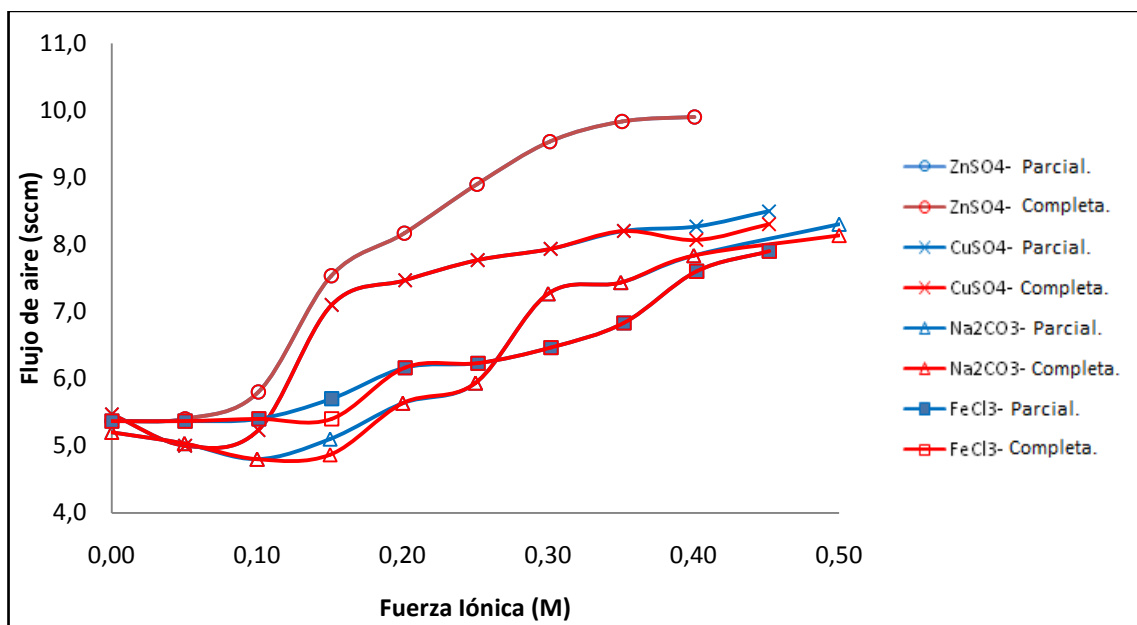


Figura 17: Gráfico de coalescencia para sales que sólo presentan prevención completa.

En el gráfico se puede observar que para bajas concentraciones de sal en solución, el punto de coalescencia de la solución, entendiéndose por tal el flujo de aire al que ocurre la coalescencia de burbujas en una solución dada, disminuye respecto del punto de coalescencia de agua pura. Luego se observó para cada una de las sales que al aumentar la concentración de la sal en la

solución, el punto de coalescencia obtenido también aumenta. Esto concuerda con los trabajos de Quinn et. al.(2007) , en donde se observó que un aumento de concentración de sal generó una disminución del tamaño de burbujas y aumento del gas holdup.

Tal y como fue descrito anteriormente, en las pruebas realizadas con carbonato de sodio (Na_2CO_3) se observaron precipitados en el fondo de la celda. Si se analiza el gráfico anterior considerando las soluciones que no precipitaron, se puede observar en función de la fuerza iónica que las que mejor previenen la coalescencia son aquellas que para una misma concentración molar tienen una fuerza iónica menor. En este caso el sulfato de zinc (ZnSO_4) y sulfato de cobre (CuSO_4) cuya fuerza iónica es 4 veces su concentración molar, previenen de mejor manera la coalescencia que el cloruro de hierro (FeCl_3) cuya fuerza iónica es 6 veces su concentración molar. En efecto, esto se puede corroborar con los valores de región de prevención tabulados en la Tabla 12 (ver anexos). La región de prevención generada por el sulfato de zinc es mayor para cada concentración que aquellas generadas por el sulfato de cobre, y a su vez la generada por el sulfato de cobre es mayor que la región de prevención del cloruro de hierro.

En la siguiente figura se puede apreciar con mayor claridad la prevención de coalescencia en términos de área de prevención, producida por cada sal en la solución.

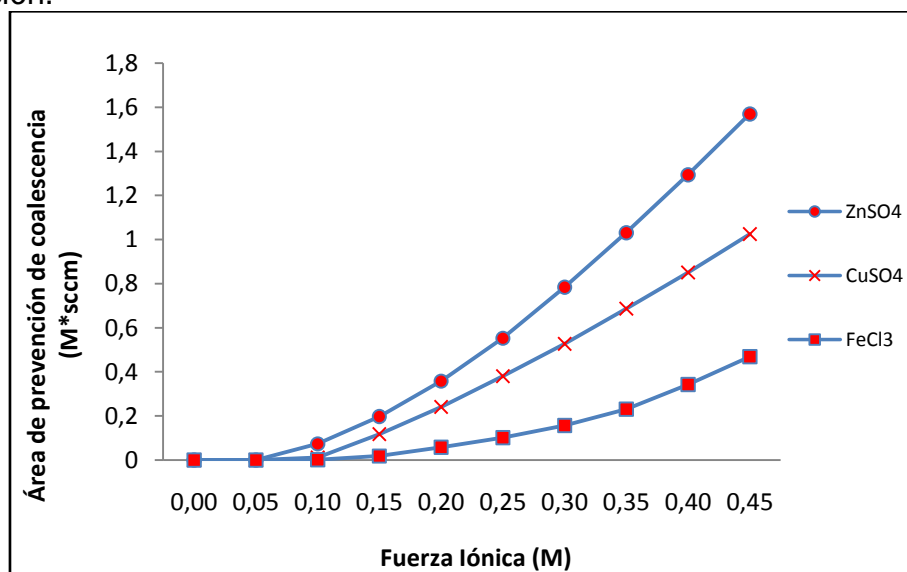


Figura 18: Gráfico de área de prevención de coalescencia para sales que presentan prevención completa.

4.1.2 Sales que presentan prevención parcial y completa de coalescencia.

En presencia de las siguientes sales, se observó la existencia de tres regiones de coalescencia, delimitadas por dos curvas, una de prevención completa y otra de prevención parcial.

- Cloruro de sodio (NaCl).
- Cloruro de potasio (KCl).
- Cloruro de calcio bihidratado ($\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$).
- Cloruro de magnesio hexahidratado ($\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$).

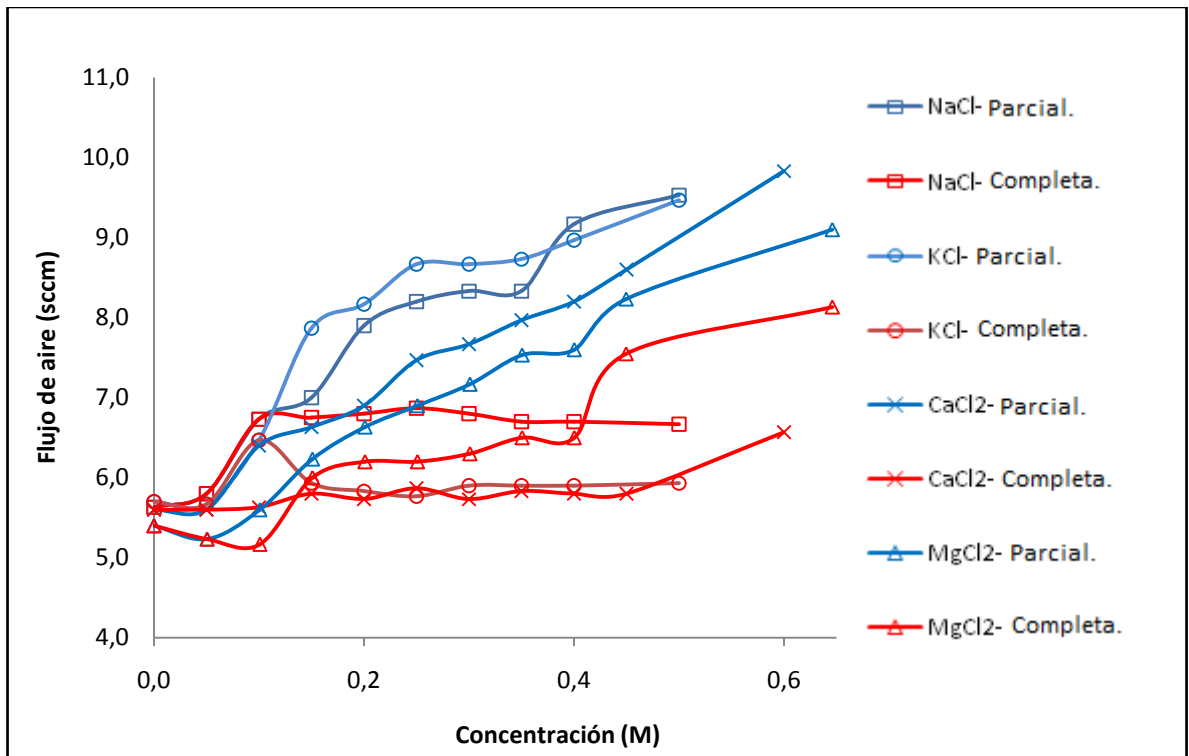


Figura 19: Gráfico de coalescencia para sales que presentan prevención parcial y completa.

La información graficada en la Figura 19 se presenta tabulada en la Tabla 13 de los anexos.

A diferencia de lo observado en las pruebas con las sales que presentan solo una prevención completa, para este grupo de sales una baja concentración de sal en solución no genera una disminución del punto de coalescencia del agua pura, a excepción del cloruro de magnesio. La disminución del punto de coalescencia del agua pura que presentan algunas de las sales estudiadas, se

podría explicar a partir de la desviación de la idealidad que presentan las soluciones con altas fuerzas iónicas. Las sales que presentan sólo prevención completa, tienen una fuerza iónica equivalente a cuatro (ZnSO_4 , CuSO_4) y seis (FeCl_3) veces su concentración molar. Esto representa una desviación de cuatro a seis veces (según sea el caso) respecto de la no idealidad de sales en solución como el NaCl y el KCl . En este mismo sentido, el cloruro de magnesio tiene una fuerza iónica que es equivalente a 3 veces su concentración molar, lo que explicaría su particular comportamiento dentro del grupo de las sales que presentan los dos tipos de prevención de coalescencia.

Respecto de la prevención parcial de las sales que presentan prevención parcial y completa, se observa que aquellas que tienen una fuerza iónica menor para una misma concentración molar, presentan una mayor región de prevención de coalescencia que aquellas que tienen una fuerza iónica mayor para la misma concentración molar. En otras palabras, se puede decir que el cloruro de sodio (NaCl) y el cloruro de potasio (KCl) previenen más la coalescencia que el cloruro de magnesio (MgCl_2) y cloruro de calcio (CaCl_2). La fuerza iónica del cloruro de sodio (NaCl) y del cloruro de potasio (KCl) es igual en magnitud a su concentración molar, en cambio el cloruro de magnesio (MgCl_2) y el cloruro de calcio (CaCl_2) tienen una fuerza iónica 3 veces mayor a las del NaCl y KCl .

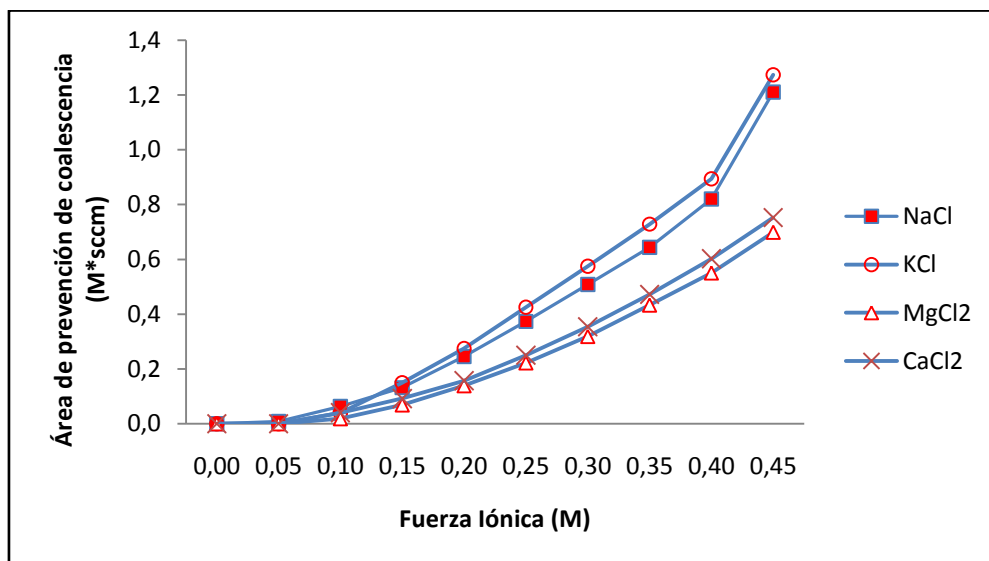


Figura 20: Gráfico de área de prevención de coalescencia para sales que presentan prevención completa.

Para las curvas de prevención completa de coalescencia todas estas sales (NaCl , KCl , CaCl_2 y MgCl_2) al aumentar la concentración de la sal en la solución presentan un aumento en el punto de coalescencia. En otras palabras, se puede decir que a mayor concentración mejor es la prevención de la

coalescencia de burbujas durante su formación. Este mismo resultado se extiende a las curvas de prevención parcial, las cuales muestran un aumento en el punto de coalescencia al aumentar la concentración de la sal en solución, excepto para el caso del cloruro de sodio. En este último caso se observa que un aumento en la concentración de la sal en la solución no genera mayores diferencias en el punto de coalescencia de la curva de prevención parcial. Existe una mayor desviación estándar de los datos medidos, lo que refleja una mayor dificultad en realizar mediciones precisas a altas concentraciones de esta sal en la solución.

Un análisis general de los datos obtenidos tanto para las sales que presentan sólo prevención completa ($ZnSO_4$, $CuSO_4$ y $FeCl_3$) como para las que presentan ambos tipos de prevención ($NaCl$, KCl , $CaCl_2$ y $MgCl_2$), sugiere que el fenómeno de coalescencia se ve influenciado por la cantidad de electrolitos en solución, su carga y su tamaño. Para una misma concentración molar aquellos iones que tienen una carga más alta tienen una mayor fuerza iónica, y se observó que a mayor fuerza iónica menor es la región de prevención que presenta la sal en solución según sea el tipo de prevención de coalescencia que presente. Además se observa que para un grupo de sal que tiene la misma razón entre fuerza iónica y concentración molar, aquella cuyo radio iónico del catión es mayor, presentan una mayor región de prevención. En la siguiente tabla se presentan un resumen de la información que sustenta este análisis.

Tabla 11: Resumen de sales y su región de prevención de coalescencia.

Sal	Fuerza Iónica / $[M]$	Radio iónico del catión (Amstrong)	Región total de prevención de integrada de 0 a 0,4 M. ($M \cdot sccm$)	Tipo de prevención que presenta la sal
KCl	1	1,33	0,89	Parcial y completa
NaCl	1	0,95	0,82	Parcial y completa
$CaCl_2$	2	0,99	0,6	Parcial y completa
$MgCl_2$	2	0,65	0,55	Parcial y completa
$ZnSO_4$	4	0,74	0,88	Completa
$CuSO_4$	4	0,69	0,85	Completa

4.2 Pruebas con alcoholes y poliglicoles.

En el caso de las pruebas con alcoholes y poliglicoles se observó prevención completa de coalescencia de burbujas. Los resultados de las

pruebas de alcoholes y poliglicoles se presentan en la Figura 21 y Figura 22 respectivamente.

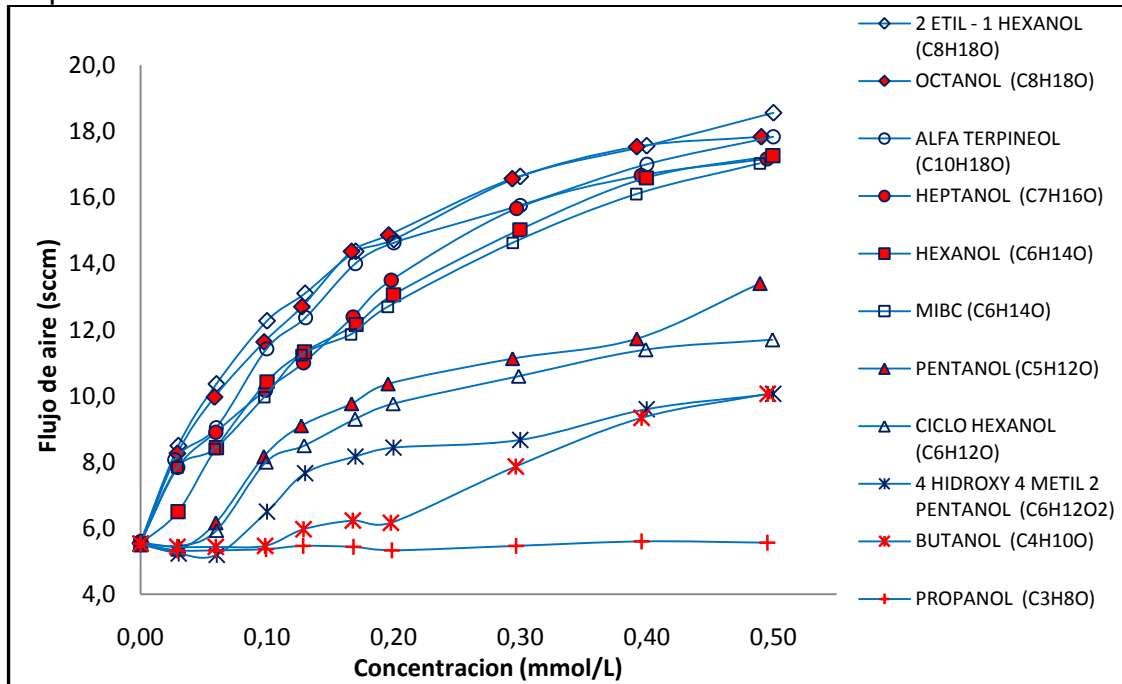


Figura 21: Curvas de coalescencia para alcoholes.

En el gráfico de coalescencia de alcoholes se observa que un aumento en la concentración del agente en la solución, previene la coalescencia puesto que esta se alcanza a un flujo de aire mayor. Además, para las mismas concentraciones de alcoholes primarios de distinto largo de cadena se observa que a mayor largo de cadena, mayor es la capacidad del alcohol para prevenir la coalescencia. Esto concuerda con lo presentado por Kracht y Finch (2009).

Los resultados sugieren que la estructura molecular de los alcoholes también juega un rol de importancia en la capacidad de un alcohol para prevenir la coalescencia. Esto se puede inferir a partir de la curva de coalescencia del hexanol, MIBC y el ciclo hexanol. Al comparar estas curvas se puede concluir que el hexanol presenta una mayor capacidad de prevención de coalescencia que el MIBC y este último una capacidad mayor que el ciclo hexanol, a pesar de que los tres alcoholes están compuestos por 6 átomos de carbono.

El promedio de las tres mediciones realizadas por cada alcohol y para cada concentración graficadas en la Figura 21 se encuentran en la Tabla 14 y en la Tabla 15.

Los resultados obtenidos en las pruebas con los polietilenglicoles (PEG) no difieren mucho respecto de los obtenidos en las pruebas con los alcoholes. En estas pruebas también se observa que a mayor concentración del PEG en la

solución, mayor es la prevención de coalescencia. Además se observa que aquellos con un mayor peso molecular promedio, presentan una mayor capacidad para prevenir coalescencia.

El dietilenglicol y el etilenglicol presentan un comportamiento muy similar en términos de prevención de coalescencia, de hecho no es posible observar una diferencia entre ambos.

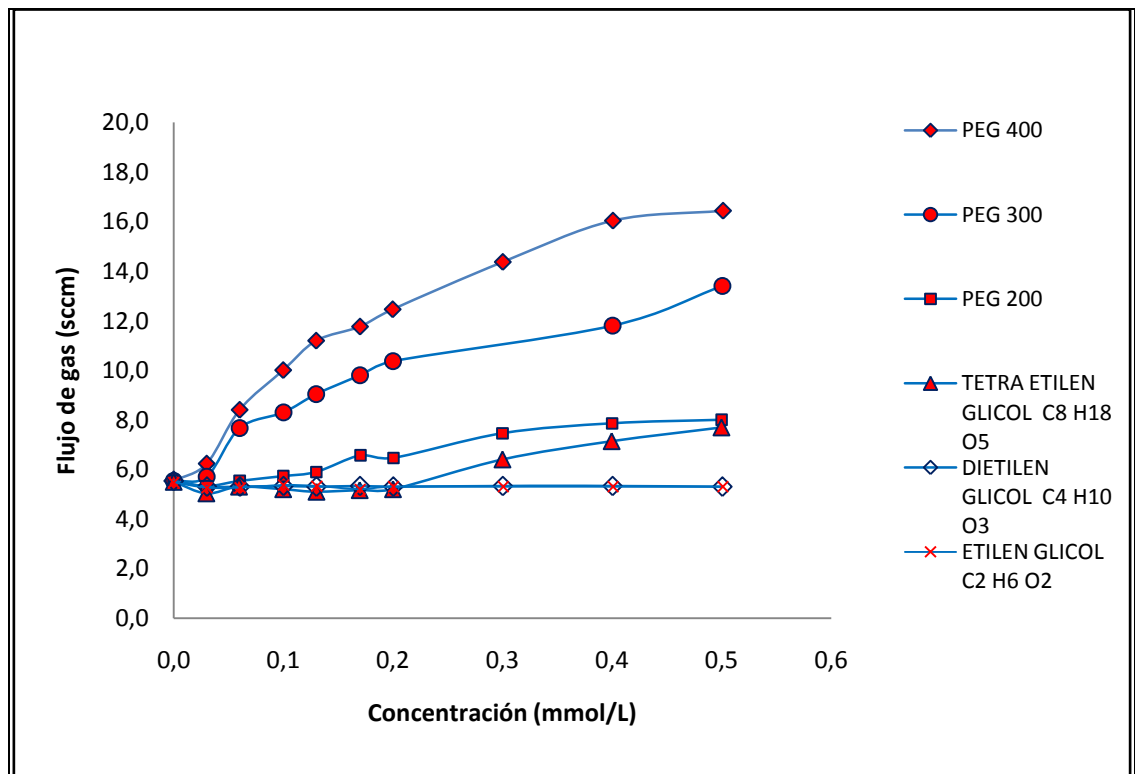


Figura 22: Gráfico de coalescencia de polietilenglicoles.

4.3 Pruebas con mezcla de dos alcoholes en proporciones distintas (fracción molar): MIBC y pentanol.

Los resultados de estas pruebas sugieren que la mezcla de MIBC y pentanol mantiene las propiedades de prevención de coalescencia de ambos agentes mezclados. Esto se puede afirmar dado que las curvas de las mezclas en diferentes proporciones de estos agentes quedan entre las curvas de cada alcohol. La mezcla con mayor fracción molar de MIBC (80%) y de menor fracción molar de pentanol (20%) es la más cercana a la curva de MIBC (100%) y queda bajo ella. Es interesante notar que la mezcla en fracciones molares de 20% MIBC y 80% pentanol a concentraciones menores a 0,3 mmol tiene una región de prevención de 1,47 mmol*sccm, mientras que la mezcla en fracciones molares iguales tiene una región de prevención de 1,36 mmol*sccm, lo que

permite afirmar que si bien las curvas de las mezclas están entre las curvas de los agentes mezclados, existen ciertas proporciones que resultan más beneficiosas en términos de prevención que otras, sin necesidad de que el agente con mayor propiedad de prevención esté en una proporción mayor en esta mezcla. También es necesario destacar que la posición de la curva de la proporción molar 50% MIBC y 50% Pentanol no es proporcional a las curvas obtenidas para cada agente en forma individual, esto sugiere que los agentes en la mezcla no mantienen completamente sus propiedades individuales de prevención de coalescencia, de hecho, se puede observar que la mezcla 50% MIBC y 50% pentanol presentan un prevención menor de coalescencia que la utilización del MIBC por sí solo.

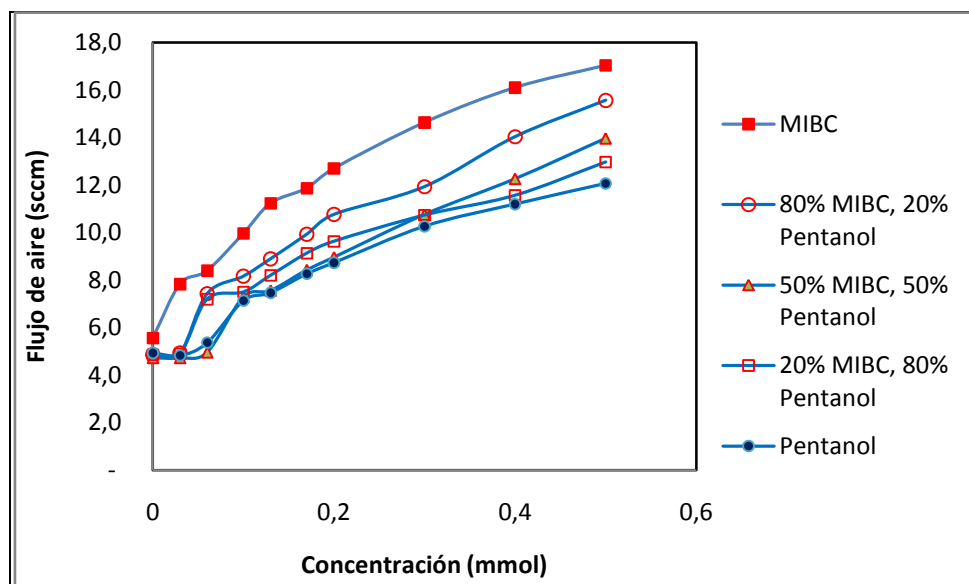


Figura 23: Gráfico de coalescencia para mezclas de MIBC y Pentanol.

4.4 Prueba con mezcla de un alcohol y un poliglicol: MIBC (4 metil 2 pentanol) y PEG 300.

El análisis en este caso es similar al anterior. Ninguna de las curvas de prevención de coalescencia de las mezclas mostró una mayor eficacia en la prevención de la coalescencia que el MIBC ni menor eficacia que el PEG 300. La mezcla que en fracción molar tiene un 80% de MIBC y un 20% de PEG 300, se encuentra más cerca de la curva del MIBC. Sin embargo es posible observar que para concentraciones menores a 0,2 mmol la mezcla en fracción molar 50% MIBC y 50% PEG 300 tiene una región de prevención de coalescencia mayor, pero para concentraciones superiores a 0,2 mmol, esta tendencia se revierte y la mezcla en fracción molar de 20% de MIBC y 80% PEG genera un efecto de prevención de coalescencia mayor.

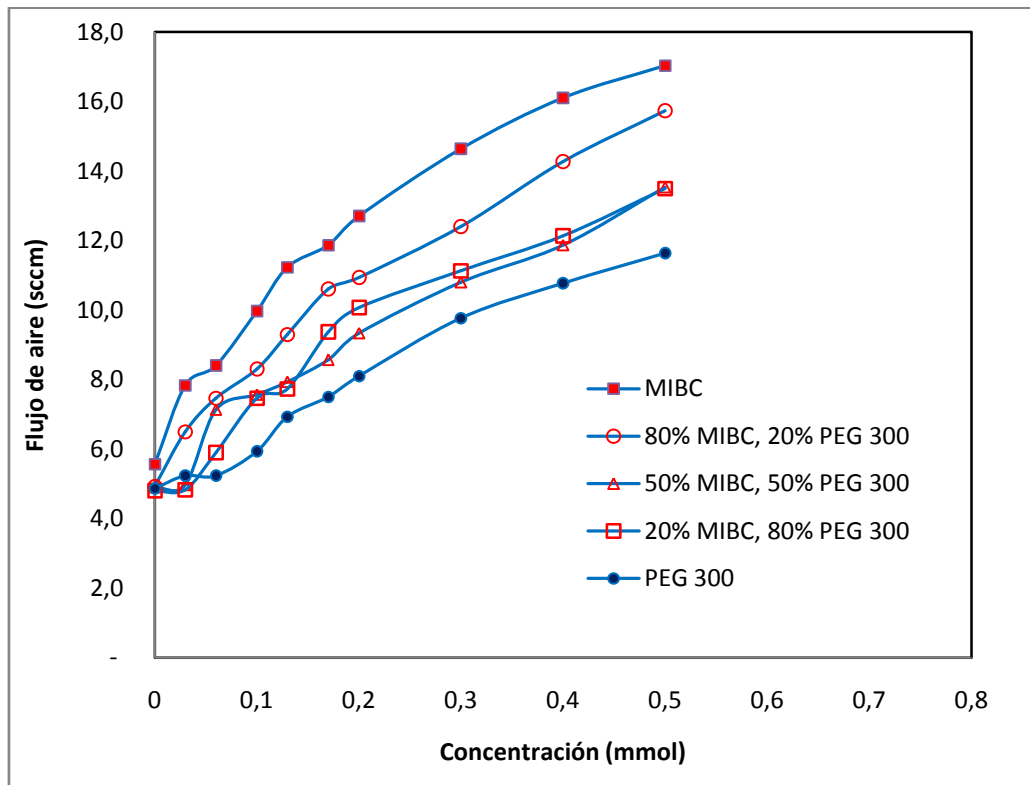


Figura 24: Gráfico de coalescencia para mezclas de MIBC y PEG 300.

Este comportamiento difiere de lo observado para la mezcla de alcoholes, puesto que en los alcoholes la mezcla 20% MIBC y 80% pentanol, en todo momento generó un área de prevención mayor que la mezcla 50/50. Este resultado permite pensar en que no solamente la proporción de la mezcla puede generar un efecto sinérgico en términos de prevención, sino que también es posible encontrar mezclas de agentes de distinta naturaleza que produzcan un efecto mayor en prevención a partir de cierta concentración de la mezcla en la solución.

4.5 Prueba con mezcla de cloruro de sodio (NaCl) y MIBC (4 metil 2 pentanol).

En la siguiente figura se puede observar el comportamiento del MIBC en una salmuera de NaCl a dos concentraciones diferentes 0,1 M y 0,5 M. Se observa una mayor prevención del MIBC cuando se añade a una solución de NaCl a 0,5M que cuando se añade a una solución 0,1M de NaCl, incluso, a altas concentraciones de MIBC en la solución de 0,1M de NaCl no se observan diferencias considerables.

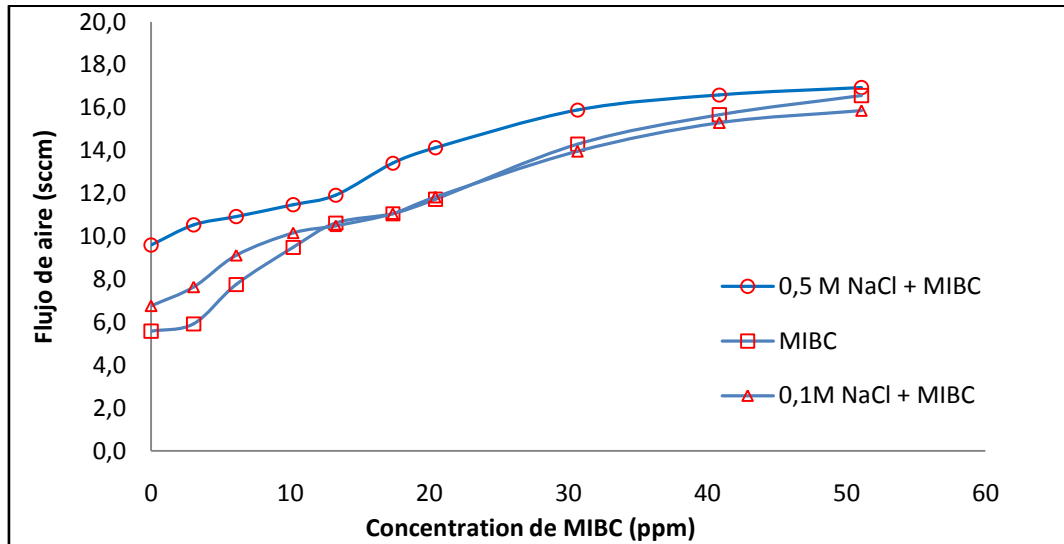


Figura 25: Gráfico de coalescencia para mezclas de MIBC y NaCl.

La concentración de MIBC usada en las plantas de beneficio que utilizan la flotación de minerales como método de concentración, suele estar en un rango de 10 a 20 ppm. Para este rango de concentraciones, los datos sugieren que la coexistencia de NaCl y MIBC en solución, para altas concentraciones de NaCl (0,5 M), generan un aumento en prevención de la coalescencia, respecto de la capacidad de cada agente por separado en términos de prevención de coalescencia en los rangos de concentraciones descritas. En efecto, la curva de coalescencia para el MIBC en una salmuera de 0,5 M de NaCl, está desplazada en el eje Y respecto de la curva de coalescencia del MIBC en agua sin NaCl en 1,3 sccm promedio, lo que da cuenta de una mayor capacidad para prevenir la coalescencia del MIBC en presencia de NaCl en solución. Este hecho cobra especial relevancia si se considera que en la actualidad las empresas mineras están tendiendo a utilizar el agua de mar en sus procesos metalúrgicos, motivadas por un lado por la escases del recurso hídrico en las regiones de explotación minera y por otro, por las políticas de desarrollo sustentable que en el caso de la gran minería forman parte de la estrategia de negocios de la mayoría de las empresas mineras del país. El agua de mar tiene una concentración variable de sales disueltas, en promedio 35 g/L, de las cuales solo un 85% corresponde a cloruro de sodio (A.W.W.A.R.F, 1998) lo que corresponde a 30 g/L de NaCl. Esta concentración equivale a una concentración de 0,5 M de NaCl.

4.6 Pruebas con mezclas de MIBC (4 metil 2 pentanol) y partículas sólidas en suspensión, hidrofílicas (cuarzo) e hidrofóbicas (concentrado de sulfuros de cobre).

Los resultados presentados en el siguiente gráfico corresponden a las pruebas en sistemas trifásicos realizadas. Se realizaron pruebas utilizando partículas sólidas hidrofílicas (cuarzo) y partículas hidrofóbicas (concentrado de cobre), a concentraciones en peso de 1% y 6%. En este caso se utilizó como agente MIBC.

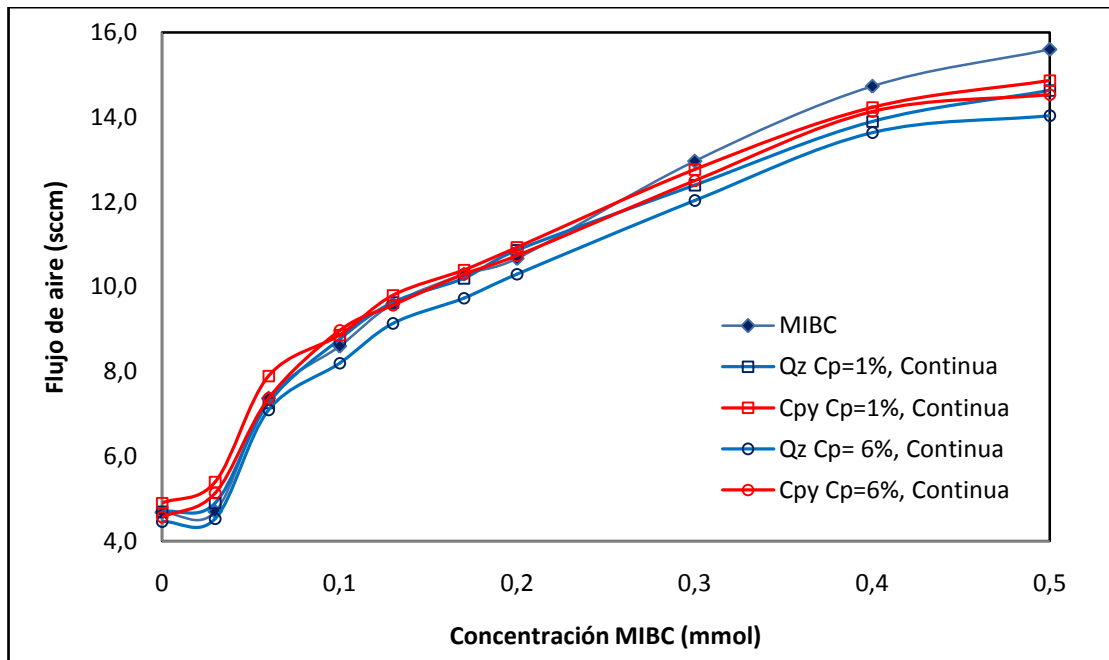


Figura 26: Curvas de coalescencia para el MIBC en presencia de partículas sólidas hidrofílicas (Qz) e hidrofóbicas (Cpy).

En el siguiente gráfico se muestran los resultados obtenidos al realizar las pruebas en un sistema trifásico con sólidos hidrofílicos (cuarzo) e hidrofóbico (concentrado de sulfuros de cobre) en agua destilada y utilizando como espumante PEG 300.

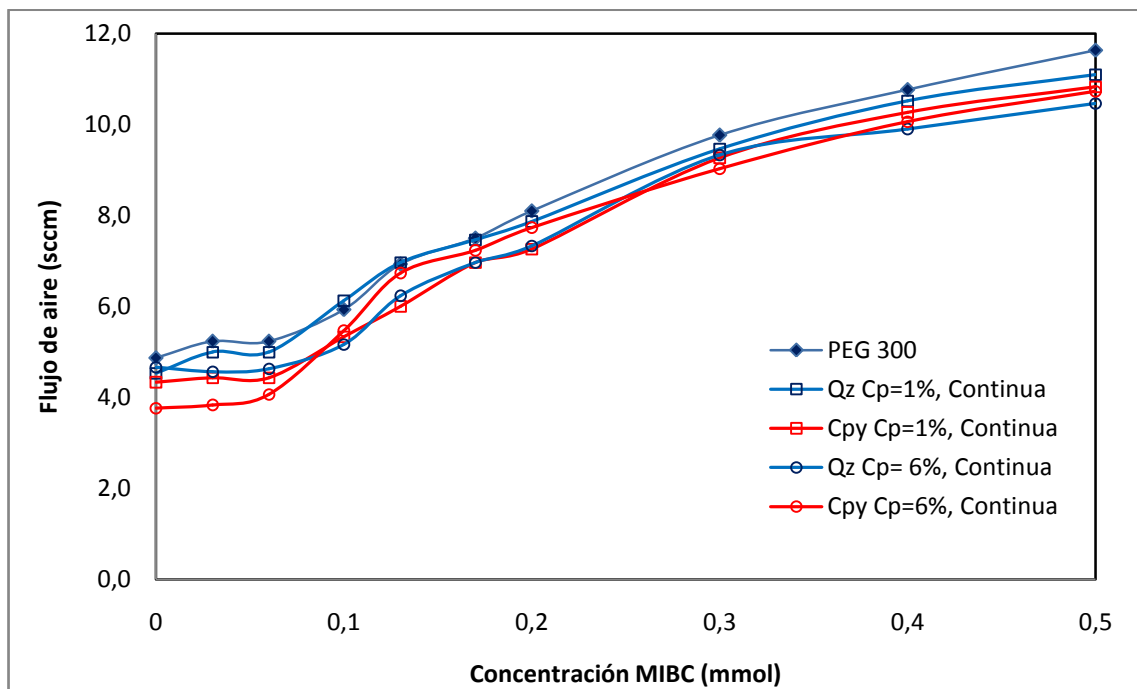


Figura 27: Curvas de coalescencia para el PEG300 en presencia de partículas sólidas hidrofílicas (Qz) e hidrofóbicas (Cpy).

Los resultados graficados y el cálculo del área de prevención de coalescencia para los datos presentados en la Figura 27 se muestran en la Tabla 21.

En general, se observó que al trabajar con partículas hidrofílicas e hidrofóbicas, se produce prevención completa y parcial para las distintas concentraciones de MIBC, aunque la diferencia de flujo de aire entre ambas es menor a 0,03 sccm en la mayoría de los casos. Por esta razón, para efectos de análisis, se concentrará la mirada sólo en las curvas de prevención parcial.

Para concentraciones de MIBC en solución menores a 20 ppm, se observa una leve mejora en la prevención de la coalescencia por parte de este agente ante la presencia de partículas hidrofóbicas para las concentraciones en peso de 1% y 6%. Sin embargo, para el mismo rango de concentración de MIBC y para las mismas concentraciones en peso pero de partículas hidrofílicas (cuarzo), los datos sugieren una disminución en la capacidad de prevención de coalescencia por parte del MIBC.

Para altas concentraciones de MIBC en solución, los datos sugieren una disminución en la capacidad de prevención de coalescencia del MIBC que depende de la concentración en peso y nivel de hidrofobicidad de las partículas sólidas en suspensión. A mayor concentración en peso de los sólidos, menor la

capacidad del MIBC para evitar la coalescencia. Según el nivel de hidrofobicidad se observa que las partículas hidrofílicas generan una mayor disminución de la capacidad del MIBC para prevenir coalescencia que las partículas hidrofóbicas, aunque ambas generan una merma en esta característica del MIBC.

En las pruebas con PEG 300 se observó que la presencia de los sólidos en suspensión disminuye la capacidad de prevención de coalescencia. A diferencia del caso anterior, para este agente a altas concentraciones lo que provoca esta disminución de capacidad de prevención del agente es la concentración en peso del sólido, más que su grado de hidrofobicidad.

5. CONCLUSIONES.

Después de realizadas las pruebas preliminares y las pruebas inherentes a la investigación realizada, se puede concluir que el *set up* tuvo un buen desempeño en términos de reproducibilidad y confiabilidad. El *set up* utilizado permite captar las emisiones acústicas y detectar los eventos de coalescencia en tiempo real, siempre que se trabaje con un capilar del diámetro utilizado en esta investigación y a flujos de aire menores a 16 sccm. Para flujos de aire mayores a éste se observa un comportamiento caótico en el sistema, entendiéndose por tal aquel estado en el que comienzan a ocurrir la coalescencia esporádica, continua de pares y tríos de burbujas en forma estocástica.

Todas las sales estudiadas previenen la coalescencia de burbujas en su formación. Se observó que a mayor concentración de la sal en solución, mayor es el efecto de prevención de coalescencia. Además, los datos sugieren que la naturaleza de los electrolitos en la solución podrían determinar la forma en que la sal en solución previene la coalescencia. Esto dado que se observó que en las pruebas con cloruro de sodio (NaCl), cloruro de potasio (KCl), cloruro de calcio bihidratado ($\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) y cloruro de magnesio hexahidratado ($\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) a ciertos flujos de aire se produjeron eventos de coalescencia esporádicos y luego para flujos mayores se produjo coalescencia continua, generándose una región de transición entre una curva de prevención parcial y completa. En cambio en las pruebas con sulfato de cobre pentahidratado, sulfato de zinc eptahidratado, carbonato de sodio y cloruro de hierro exahidratado sólo se observó prevención completa.

Sobre los alcoholes estudiados se observó, en el caso de los alcoholes normales, que su capacidad de prevenir la coalescencia aumenta según aumente su largo de cadena hidrocarbonada. En otras palabras se puede decir que los alcoholes normales cuya cadena es más larga presentan una mayor capacidad para prevenir coalescencia que los alcoholes de cadena corta. Esto concuerda con lo presentado por Kracht y Finch (2009). Los datos además sugieren que la estructura molecular del alcohol juega un rol importante en su capacidad para prevenir la coalescencia. Esto se deduce a raíz del comportamiento observado para el hexanol, ciclo hexanol y MIBC (4 metil 2 pentanol). Estos alcoholes poseen 6 carbonos en su composición, sin embargo presentan estructuras moleculares distintas y un comportamiento distinto en términos de prevención de coalescencia. Entre ellos el que mejor previene la coalescencia es el alcohol normal, luego en orden de prevención se encuentra el MIBC ambos con una capacidad que es casi el doble de la capacidad de prevención de coalescencia que presenta el ciclo hexanol. El comportamiento

del MIBC y el hexanol observado en este trabajo difiere del observado en lo presentado por Kracht y Finch (2009). En este trabajo el hexanol muestra una mayor capacidad para prevenir coalescencia que el MIBC, en cambio, según lo presentado por Kracht y Finch(2009) el MIBC presenta mayor capacidad para prevenir la coalescencia que el hexanol. Esta diferencia puede explicarse por el tipo de MIBC utilizado, puesto que en las pruebas de Kracht y Finch el MIBC es técnico y no puro como en el utilizado en este trabajo.

En todos los alcoholes se observó, al igual que en las sales, que a mayor concentración del agente en la solución mayor es la cantidad de energía necesaria para producir la coalescencia de las burbujas.

Los resultados observados en los experimentos con poliglicoles muestran que a mayor peso molecular mayor es la capacidad del agente para prevenir la coalescencia de burbujas en su formación. También se observa que a mayor concentración del agente en solución mayor es la prevención de la coalescencia.

En los experimentos con mezclas de alcoholes y poliglicoles no fue posible observar un efecto sinérgico. Sin embargo, se observa que tanto en la prueba de mezcla de alcoholes como en la mezcla de un alcohol y un poliglicol la posición de las curvas de las mezclas 50/50 (fracción molar) no son proporcionales a la fracción.

En la mezclas de MIBC y NaCl se observó que a concentraciones de NaCl similares a las de agua de mar, el MIBC aumenta su capacidad en términos de prevención de coalescencia en los rangos de concentración de este agente comúnmente usados en operaciones de flotación de minerales (10 a 20 ppm). Esto se vislumbra como una oportunidad toda vez que se plantea el uso de agua de mar en los procesos de flotación de minerales.

En términos generales se puede concluir que la coalescencia de burbujas se ve fuertemente afectado por la concentración y naturaleza de los electrolitos en el caso de las sales, y por la concentración y estructura molecular en el caso de los alcoholes. Además se concluye que la coalescencia no puede ser explicada solamente por los cambios en la tensión superficial, puesto que tanto las sales como los alcoholes y poliglicoles mostraron propiedades de prevención de coalescencia y es claro que en términos de tensión superficial ambos tipos de agentes, sales y alcoholes, actúan de forma opuesta, toda vez que las sales aumentan la tensión superficial al aumentar su concentración en la solución y que los alcoholes, por ser tensoactivos, disminuyen la tensión superficial. Los datos e información recolectada y analizada en esta investigación hacen suponer que se deben considerar en el estudio y

comprensión del fenómeno de coalescencia los efectos de transferencia de masa y naturaleza de los agentes en solución.

6. REFERENCIAS.

A look at three measurements techniques for bubble size determination por Vazquez A., et al. Experimental thermal and Fluid Science, 30: 49-57, marzo 2005.

Acoustic Measurement of Bubble Size Distributions. Theory & Experiments por Duraiswami et al. The Journal of the Acoustical Society of America, 100: 2804-2805, octubre 1996.

American Water Works Association Research Foundation. Tratamiento del agua por procesos de membrana: principios, procesos y aplicaciones. Madrid, McGraw-Hill, 1998. 3p.

Boletin mensual electrónico junio 2011 [en línea] <<http://www.cochilco.cl/productos/boletin.asp?anio=2011&mes=06>> [consulta: 20 julio 2011].

Comparing the effect of salts and frother MIBC on gas dispersion and froth properties por Quinn J., et al. Minerals Engineering (20): 1296-1302, Julio 2007.

Craig V. Bubble coalescence and specific ion effects. Current Opinion in Colloid & Interface Science, 9: 178-184, agosto 2004.

Effect of solid particles on gas hold-up in flotation columns - I. Measurement por Banisi S., Finch J.A., Laplante A.R., Weber M.E. Chemical Engineering Science, 50: 2329-2334, julio 1995.

Gas hold-up in slurry bubble columns: effect of column diameter and slurry concentrations por Krishna, R., et al. AIChE Journal, 43(2): 311-316, febrero 1997.

Harbort G., Schwarz S. Characterisation measurements in industrial flotation cells. En: The Australasian Institute of Mining and Metallurgy (AUSIMM), Flotation plant optimization- A metallurgical guide to identifying and solving problems in flotation plants, 1^a ed. Australia, 2010. p. 95-106.

Keitel G., Onken U. Inhibition of bubble coalescence by solutes in air/water dispersions. Chemical Engineering Science, 37: 1635-1638, abril 1982.

Koczko K, Koczko J., Wasan D. Mechanisms for antifoaming action in aqueous systems by hydrophobic particles and insoluble liquids. *Journal of Colloid and Interface Science*, 166: 225-238, agosto 1994.

Kracht W., Finch J.A., 2009. Using Sound to study bubble coalescence. *Journal of Colloid and Interface Science*, 332: 237-245, abril 2009.

Kuan S., Finch J. Impact of talc on pulp and froth properties in F150 and 1-pentanol frother systems. *Minerals Engineering*, 23: 1003-1009, 2010.

Leighton T.G., Walton A. J. An experimental study of the sound emitted from gas bubbles in a liquid. *European Journal of Physics*, 8(2): 98-104, septiembre 1986.

Leighton T.G., Fagan K. J., Field J.E. Acoustic and photographic studies of injected bubbles. *European Journal of Physics*, 12: 77-85, Julio 1990.

Leighton T.G., Phelps A.D., Ramble D.G., Sharpe D.A. Comparison of the abilities of eight acoustic techniques to detect and size a single bubble. *Ultrasonics*, 34: 661-667.

Leighton T.G. *The Acoustic Bubble*. California, Academic Press, 1997. 613p.

Leighton T.G. From seas to surgeries, from babbling brooks to baby scans - the acoustics of gas bubble. *Proceedings of the Institute of Acoustics*, 26:357-381, 2004.

Leighton T.G., Phelps A.D., Simpson M.D. *Oceanic Bubble Sizing: Measurements and Proposed Studies*. ISVR Technical Report, N° 273, enero 1998.

Loewen M., Melville W. A model of the sound generated by breaking waves. *The Journal of Acoustical Society of America*, 90(4): 2075- 2080, octubre 1991.

Manasseh R., Riboux G., Risso F. Sound generation on bubble coalescence following detachment. *International Journal of Multiphase Flow*, 34: 938-949, febrero 2007.

Manasseh R., Riboux G., Bui A., Risso F. Sound emission on bubble coalescence: imaging, acoustic and numerical experiments. En: *Australasian Fluid Mechanics Conference (16th, 2007, Australia)*.

Marrucci G. A theory of coalescence. *Chemical Engineering Science*, 24: 975-985, diciembre 1968.

Strasberg M. Gas bubbles as sources of sound in liquids. *Journal of the Acoustical Society of America*, 28: 20-26, 1956.

Vazquez A., Manasseh R., Sánchez R., Metcalfe G. Experimental comparison between acoustic and pressure signals from a bubbling flow. *Chemical Engineering Science*, 63: 5860-5869, diciembre 2008.

Van der Zon M., Hamersma P., Poels E., Blik A. Coalescence of freely moving bubbles in water by the action of suspended hydrophobic particles. *Chemical Engineering Science*, 57: 4845-4853, 2002.

Vokurka K. Amplitudes of free oscillations in liquids. *Journal of Sound and Vibration*, 141: 259-275, septiembre 1990.

ANEXOS.

ANEXO A: Detalle de mediciones realizadas.

Tabla 12: Mediciones de flujo de aire al que ocurre coalescencia en sales que presentan coalescencia completa.

Sal	Detalle	Unidad	Medición									
Na ₂ CO ₃	IS	M	0,00	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,50
	Concentración	M	0,00	0,02	0,03	0,05	0,07	0,08	0,10	0,12	0,13	0,17
	Prevención parcial	sccm	5,20	5,03	4,80	5,10	5,63	5,93	7,27	7,43	7,83	8,30
	Prevención completa	sccm	5,20	5,03	4,80	4,87	5,63	5,93	7,27	7,43	7,83	8,13
	Región de prevención	M*sccm	0,00	0,01	0,01	0,03	0,07	0,13	0,25	0,38	0,53	0,88
ZnSO ₄	IS	M	0,00	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45
	Concentración	M	0,00	0,01	0,03	0,04	0,05	0,06	0,08	0,09	0,10	0,11
	Prevención parcial	sccm	5,40	5,37	5,40	5,80	7,53	8,17	8,90	9,53	9,83	9,90
	Prevención completa	sccm	5,40	5,37	5,40	5,80	7,53	8,17	8,90	9,53	9,83	9,90
	Región de prevención	M*sccm	0,00	0,00	0,00	0,02	0,13	0,27	0,45	0,66	0,88	1,10
CuSO ₄	IS	M	0,00	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45
	Concentración	M	0,00	0,01	0,03	0,04	0,05	0,06	0,08	0,09	0,10	0,11
	Prevención parcial	sccm	5,47	5,00	5,23	7,10	7,47	7,77	7,93	8,20	8,27	8,50
	Prevención completa	sccm	5,47	5,00	5,23	7,10	7,47	7,77	7,93	8,20	8,07	8,30
	Región de prevención	M*sccm	0,00	0,00	0,01	0,12	0,24	0,38	0,53	0,69	0,85	1,03
FeCl ₃	IS	M	0,00	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45
	Concentración	M	0,00	0,01	0,02	0,03	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08
	Prevención parcial	sccm	5,37	5,37	5,40	5,70	6,17	6,23	6,47	6,83	7,60	7,90
	Prevención completa	sccm	5,37	5,37	5,40	5,40	6,17	6,23	6,47	6,83	7,60	7,90
	Región de prevención	M*sccm	0,00	0,00	0,00	0,02	0,06	0,10	0,16	0,23	0,34	0,47

Tabla 13: Mediciones de flujo de aire al que ocurre coalescencia en soluciones con sales que presentan coalescencia esporádica y completa.

Sal	Detalle	Unidad	Medición										
NaCl	IS	M	0,00	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,50	-
	Concentración (M)	M	0,00	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,50	-
	Prevención parcial	sccm	5,63	5,80	6,73	7,00	7,90	8,20	8,33	8,33	9,17	9,53	-
	Prevención completa	sccm	5,63	5,80	6,73	6,75	6,80	6,87	6,80	6,70	6,70	6,67	-
	Región de prevención	M*sccm	0,00	0,01	0,06	0,13	0,25	0,37	0,51	0,64	0,82	1,21	-
KCl	IS	M	0,00	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,50	-
	Concentración (M)	M	0,00	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,50	-
	Prevención parcial	sccm	5,70	5,67	6,47	7,87	8,17	8,67	8,67	8,73	8,97	9,47	-
	Prevención completa	sccm	5,70	5,67	6,47	5,93	5,83	5,77	5,90	5,90	5,90	5,93	-
	Región de prevención	M*sccm	0,00	0,00	0,04	0,15	0,28	0,43	0,58	0,73	0,89	1,27	-
CaCl ₂	IS	M	0,00	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,60
	Concentración (M)	M	0,00	0,02	0,03	0,05	0,07	0,08	0,10	0,12	0,13	0,15	0,20
	Prevención parcial	sccm	5,60	5,60	6,40	6,63	6,90	7,47	7,67	7,97	8,20	8,60	9,83
	Prevención completa	sccm	5,60	5,60	5,63	5,80	5,73	5,87	5,73	5,83	5,80	5,80	6,57
	Región de prevención	M*sccm	0,00	0,00	0,04	0,09	0,16	0,25	0,35	0,47	0,60	0,75	1,39
MgCl ₂	IS	M	0,00	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,65
	Concentración (M)	M	0,00	0,02	0,03	0,05	0,07	0,08	0,10	0,12	0,13	0,15	0,20
	Prevención parcial	sccm	5,40	5,23	5,60	6,23	6,63	6,90	7,17	7,53	7,60	8,23	9,10
	Prevención completa	sccm	5,40	5,23	5,17	6,00	6,20	6,20	6,30	6,50	6,50	7,55	8,13
	Región de prevención	M*sccm	0,00	0,00	0,02	0,07	0,14	0,22	0,32	0,43	0,55	0,70	1,46

Tabla 14: Mediciones de flujo de aire al que ocurre coalescencia en soluciones con alcoholes.

Alcohol	Detalle	Unidades	Mediciones									
CICLO HEXANOL	Concentración	mmol	-	0,0	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,3	0,4	0,5
		ppm	-	3,0	6,0	9,9	13,0	17,0	20,0	29,9	40,0	50,0
	Prevención completa	sccm	5,6	5,5	5,9	8,0	8,5	9,3	9,8	10,6	11,4	11,7
	Región de prevención	mmol*sccm	-	-	0,01	0,10	0,09	0,15	0,13	0,51	0,59	0,62
MIBC (4 METIL 2 PENTANOL)	Concentración	mmol	-	0,0	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,3	0,4	0,5
		ppm	-	3,0	6,0	10,0	13,0	17,0	20,0	30,0	40,0	50,0
	Prevención completa	sccm	5,6	7,8	8,4	10,0	11,2	11,9	12,7	14,6	16,1	17,0
	Región de prevención	mmol*sccm	-	-	0,08	0,17	0,17	0,25	0,21	0,89	1,03	1,12
ALFA TERPINEOL	Concentración	mmol	-	0,0	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,3	0,4	0,5
		ppm	-	4,2	9,2	15,4	20,1	26,2	30,9	46,3	61,7	77,1
	Prevención completa	sccm	5,6	8,1	9,0	11,4	12,4	14,0	14,6	15,8	17,0	17,8
	Región de prevención	mmol*sccm	-	-	0,11	0,23	0,21	0,33	0,27	1,02	1,14	1,22
2 ETIL - 1 HEXANOL	Concentración	mmol	-	0,0	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,3	0,4	0,5
		ppm	-	3,9	7,8	13,0	16,9	22,2	26,1	39,1	52,1	65,1
	Prevención completa	sccm	5,6	8,5	10,4	12,3	13,1	14,4	14,7	16,6	17,6	18,6
	Región de prevención	mmol*sccm	-	-	0,14	0,27	0,23	0,35	0,27	1,11	1,20	1,30
4 HIDROXY 4 METIL 2 PENTANOL	Concentración	mmol	-	0,0	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,3	0,4	0,5
		ppm	-	3,5	7,0	11,6	15,1	19,7	23,2	34,8	46,5	58,1
	Prevención completa	sccm	5,5	5,2	5,2	6,5	7,7	8,2	8,4	8,7	9,6	10,1
	Región de prevención	mmol*sccm	-	-	-	0,05	0,07	0,12	0,10	0,35	0,44	0,49

Tabla 15: Mediciones de flujo de aire al que ocurre coalescencia en soluciones con alcoholes normales.

Alcohol	Detalle	Unidades	Mediciones									
PENTANOL	Concentración	mmol	-	0,0	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,3	0,4	0,5
		ppm	-	2,6	5,2	8,6	11,2	14,7	17,2	25,9	34,6	43,2
	Prevención completa	sccm	5,5	5,4	6,2	8,2	9,1	9,8	10,4	11,1	11,7	13,4
	Región de prevención	mmol*sccm	-	-	0,02	0,11	0,11	0,17	0,14	0,57	0,63	0,78
OCTANOL	Concentración	mmol	-	0,0	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,3	0,4	0,5
		ppm	-	3,8	7,6	12,7	16,6	21,7	25,5	38,3	51,1	63,9
	Prevención completa	sccm	5,5	8,3	10,0	11,6	12,7	14,4	14,9	16,6	17,5	17,8
	Región de prevención	mmol*sccm	-	-	0,13	0,24	0,21	0,35	0,27	1,08	1,18	1,21
HEPTANOL	Concentración	mmol	-	0,0	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,3	0,4	0,5
		ppm	-	3,4	6,9	11,5	15,0	19,5	23,0	34,5	46,0	57,5
	Prevención completa	sccm	5,6	7,8	8,9	10,2	11,0	12,4	13,5	15,7	16,7	17,2
	Región de prevención	mmol*sccm	-	-	0,10	0,18	0,16	0,27	0,24	1,00	1,10	1,15
BUTANOL	Concentración	mmol	-	0,0	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,3	0,4	0,5
		ppm	-	2,2	4,4	7,3	9,5	12,4	14,7	22,0	29,3	36,7
	Prevención completa	sccm	5,5	5,4	5,4	5,5	6,0	6,2	6,2	7,9	9,3	10,1
	Región de prevención	mmol*sccm	-	-	-	0,00	0,02	0,03	0,02	0,24	0,39	0,46
PROPANOL	Concentración	mmol	-	0,0	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,3	0,4	0,5
		ppm	-	1,8	3,6	6,0	7,7	10,1	11,9	17,8	23,8	29,8
	Prevención completa	sccm	5,5	5,3	5,3	5,4	5,5	5,4	5,3	5,5	5,6	5,6
	Región de prevención	mmol*sccm	-	-	-	0,00	0,00	0,00	-	0,01	0,03	0,02
HEXANOL	Concentración	mmol	-	0,0	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,3	0,4	0,5
		ppm	-	3,0	6,1	10,2	13,2	17,4	20,4	30,6	40,8	51,1
	Prevención completa	sccm	5,5	6,5	8,4	10,4	11,3	12,2	13,1	15,0	16,6	17,3
	Región de prevención	mmol*sccm	-	-	0,09	0,20	0,17	0,27	0,22	0,95	1,11	1,17

Tabla 16: Mediciones de flujo de aire que producen coalescencia para soluciones de polietilenglicoles.

Alcohol	Detalle	Unidades	Mediciones									
DIETILEN GLICOL	Concentración	mmol	-	0,0	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,3	0,4	0,5
		ppm	-	3,2	6,4	10,6	13,8	18,0	21,2	31,8	42,4	53,1
	Prevención completa	sccm	5,5	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3
	Región de prevención	mmol*sccm	-	-	-	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01
TETRA ETILEN GLICOL	Concentración	mmol	-	0,0	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,3	0,4	0,5
		ppm	-	5,8	11,7	19,4	25,2	33,0	38,8	58,3	77,7	97,1
	Prevención completa	sccm	5,5	5,0	5,3	5,2	5,1	5,2	5,2	6,4	7,1	7,7
	Región de prevención	mmol*sccm	-	-	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03	0,16	0,37	0,64
PEG 400	Concentración	mmol	-	0,0	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,3	0,4	0,5
		ppm	-	12,0	24,0	40,0	52,0	68,0	80,0	120,0	160,0	200,0
	Prevención completa	sccm	5,5	6,2	8,4	10,0	11,2	11,8	12,5	14,4	16,0	16,4
	Región de prevención	mmol*sccm	-	-	0,09	0,26	0,43	0,68	0,89	1,78	2,83	3,93
PEG 300	Concentración	mmol	-	0,0	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,3	0,4	0,5
		ppm	-	9,0	18,0	30,0	39,0	51,0	60,0	90,0	120,0	150,0
	Prevención completa	sccm	5,5	5,7	7,7	8,3	9,0	9,8	10,4	-	11,8	13,4
	Región de prevención	mmol*sccm	-	-	0,06	0,18	0,28	0,45	0,60	-	1,22	2,01
PEG 200	Concentración	mmol	-	0,0	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,3	0,4	0,5
		ppm	-	6,0	12,0	20,0	26,0	34,0	40,0	60,0	80,0	100,0
	Prevención completa	sccm	5,5	5,3	5,5	5,7	5,9	6,6	6,5	7,5	7,9	8,0
	Región de prevención	mmol*sccm	-	-	0,01	0,02	0,04	0,09	0,12	0,34	0,59	0,85
ETILEN GLICOL	Concentración	mmol	-	0,0	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,3	0,4	0,5
		ppm	-	1,9	3,7	6,2	8,1	10,6	12,4	18,6	24,8	31,0
	Prevención completa	sccm	5,5	5,3	5,3	5,4	5,3	5,2	5,3	5,3	5,3	5,3
	Región de prevención	mmol*sccm	-	-	0,00	0,01	0,01	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05

Tabla 17: Mediciones de flujo de aire que producen coalescencia para mezclas en distintas proporciones (fracción molar) de MIBC y Pentanol.

Mezcla	Detalle	Unidades	Mediciones									
			0,00	0,03	0,06	0,10	0,13	0,17	0,20	0,30	0,40	0,50
MIBC	Concentración	mmol	0,00	0,03	0,06	0,10	0,13	0,17	0,20	0,30	0,40	0,50
	Prevención completa	sccm	5,57	7,83	8,40	9,97	11,23	11,87	12,70	14,63	16,10	17,03
	Región de prevención	mmol*sccm	-	0,24	0,49	0,66	0,83	1,09	1,30	2,21	3,26	4,41
MEZCLA (FRACCIÓN MOLAR) 20% MIBC Y 80% PENTANOL	Concentración	mmol	0,00	0,03	0,06	0,10	0,13	0,17	0,20	0,30	0,40	0,50
	Prevención completa	sccm	4,87	4,90	7,20	7,50	8,20	9,13	9,63	10,73	11,57	12,97
	Región de prevención	mmol*sccm	-	0,15	0,36	0,47	0,57	0,74	0,88	1,47	2,14	2,95
MEZCLA (FRACCIÓN MOLAR) 50% MIBC Y 50% PENTANOL	Concentración	mmol	0,00	0,03	0,06	0,10	0,13	0,17	0,20	0,30	0,40	0,50
	Prevención completa	sccm	4,73	4,73	4,97	7,30	7,57	8,43	8,97	10,77	12,27	13,97
	Región de prevención	mmol*sccm	-	0,14	0,29	0,39	0,48	0,63	0,75	1,36	2,11	3,03
MEZCLA (FRACCIÓN MOLAR) 80% MIBC Y 20% PENTANOL	Concentración	mmol	0,00	0,03	0,06	0,10	0,13	0,17	0,20	0,30	0,40	0,50
	Prevención completa	sccm	4,87	4,93	7,43	8,17	8,90	9,93	10,77	11,93	14,03	15,57
	Región de prevención	mmol*sccm	-	0,15	0,37	0,50	0,62	0,83	1,00	1,71	2,63	3,70
PENTANOL	Concentración	mmol	0,00	0,03	0,06	0,10	0,13	0,17	0,20	0,30	0,40	0,50
	Prevención completa	sccm	4,93	4,83	5,37	7,13	7,47	8,27	8,73	10,27	11,20	12,07
	Región de prevención	mmol*sccm	-	0,15	0,31	0,40	0,48	0,61	0,73	1,27	1,91	2,63

Tabla 18: Mediciones de flujo de aire que producen coalescencia para mezclas en distintas proporciones (fracción molar) de MIBC y PEG 300.

Mezcla	Detalle	Unidades	Mediciones									
			0,00	0,03	0,06	0,10	0,13	0,17	0,20	0,30	0,40	0,50
MIBC	Concentración	mmol	0,00	0,03	0,06	0,10	0,13	0,17	0,20	0,30	0,40	0,50
	Prevención completa	sccm	5,57	7,83	8,40	9,97	11,23	11,87	12,70	14,63	16,10	17,03
	Región de prevención	mmol*sccm	-	0,07	0,15	0,33	0,50	0,75	0,97	1,87	2,93	4,07
MEZCLA (FRACCIÓN MOLAR) 20% MIBC Y 80% PEG300	Concentración	mmol	0,00	0,03	0,06	0,10	0,13	0,17	0,20	0,30	0,40	0,50
	Prevención completa	sccm	4,80	4,83	5,90	7,47	7,73	9,37	10,07	11,13	12,13	13,50
	Región de prevención	mmol*sccm	-	0,15	0,32	0,43	0,52	0,70	0,86	1,49	2,22	3,09
MEZCLA (FRACCIÓN MOLAR) 50% MIBC Y 50% PEG300	Concentración	mmol	0,00	0,03	0,06	0,10	0,13	0,17	0,20	0,30	0,40	0,50
	Prevención completa	sccm	4,90	4,97	7,13	7,57	7,93	8,57	9,33	10,80	11,87	13,53
	Región de prevención	mmol*sccm	-	0,15	0,36	0,47	0,56	0,71	0,84	1,43	2,13	2,99
MEZCLA (FRACCIÓN MOLAR) 80% MIBC Y 20% PEG300	Concentración	mmol	0,00	0,03	0,06	0,10	0,13	0,17	0,20	0,30	0,40	0,50
	Prevención completa	sccm	4,93	6,50	7,47	8,30	9,30	10,60	10,93	12,40	14,27	15,73
	Región de prevención	mmol*sccm	-	0,20	0,42	0,55	0,68	0,91	1,09	1,84	2,77	3,85
PEG 300	Concentración	mmol	0,00	0,03	0,06	0,10	0,13	0,17	0,20	0,30	0,40	0,50
	Prevención completa	sccm	4,87	5,23	5,23	5,93	6,93	7,50	8,10	9,77	10,77	11,63
	Región de prevención	mmol*sccm	-	0,16	0,31	0,36	0,42	0,52	0,62	1,11	1,70	2,38

Tabla 19: Mediciones de flujo de aire que producen coalescencia para soluciones salinas de NaCl con concentración 0,1 y 0,5 M y MIBC.

Mezcla	Detalle	Unidades	Mediciones										
0,1 M de NaCl y MIBC	Concentración de MIBC	mmol	-	-	0,0	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,3	0,4	0,5
		ppm	-	-	4,8	9,5	14,3	20,7	27,0	31,8	47,7	63,5	79,4
	Prevención completa	sccm	5,6	6,8	7,7	9,1	10,2	10,5	11,1	11,8	14,0	15,3	15,9
	Región de prevención	mmol*sccm	-	-	0,06	0,17	0,35	0,50	0,72	0,91	1,74	2,72	3,74
0,5 M de NaCl y MIBC	Concentración de MIBC	mmol	-	-	0,0	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,3	0,4	0,5
		ppm	-	-	4,8	9,5	14,3	20,7	27,0	31,8	47,7	63,5	79,4
	Prevención completa	sccm	5,6	9,4	10,0	10,8	11,5	11,9	13,0	13,8	15,6	16,1	16,4
	Región de prevención	mmol*sccm	-	-	0,13	0,29	0,53	0,72	1,01	1,26	2,26	3,31	4,40

Tabla 20: Mediciones de flujos de aire a los que se produce coalescencia en sistemas trifásicos con sólidos de cuarzo o concentrado de sulfuros de cobre a 1% y 6% de concentración en peso, usando MIBC como espumante.

Mezcla	Detalle	Unidades	Mediciones									
			0,00	0,03	0,06	0,10	0,13	0,17	0,20	0,30	0,40	0,50
MIBC en Agua destilada	Concentración	mmol	0,00	0,03	0,06	0,10	0,13	0,17	0,20	0,30	0,40	0,50
	Prevención completa	sccm	4,69	4,70	7,37	8,60	9,60	10,30	10,67	12,97	14,73	15,60
	Región de prevención	mmol*sccm	-	0,00	0,08	0,24	0,38	0,61	0,79	1,62	2,62	3,71
MIBC en suspensión de cuarzo Cp=1%	Concentración	mmol	0,00	0,03	0,06	0,10	0,13	0,17	0,20	0,30	0,40	0,50
	Prevención completa	sccm	4,57	4,77	7,07	8,47	9,37	10,03	10,50	12,00	13,30	14,00
	Prevención parcial	sccm	4,70	4,90	7,27	8,77	9,63	10,20	10,87	12,40	13,90	14,63
	Región de prevención	mmol*sccm	-	0,01	0,08	0,25	0,39	0,61	0,80	1,57	2,49	3,48
MIBC en suspensión de cuarzo Cp=6%	Concentración	mmol	0,00	0,03	0,06	0,10	0,13	0,17	0,20	0,30	0,40	0,50
	Prevención completa	sccm	4,27	4,47	6,73	7,93	8,57	9,30	9,73	11,10	12,20	12,73
	Prevención parcial	sccm	4,47	4,53	7,10	8,20	9,13	9,73	10,30	12,03	13,63	14,03
	Región de prevención	mmol*sccm	-	0,00	0,08	0,23	0,37	0,58	0,76	1,51	2,43	3,39
MIBC en suspensión de concentrado de sulfuros de cobre Cp=1%	Concentración	mmol	0,00	0,03	0,06	0,10	0,13	0,17	0,20	0,30	0,40	0,50
	Prevención completa	sccm	4,73	5,23	7,30	8,70	9,70	10,30	10,73	12,77	13,90	14,87
	Prevención parcial	sccm	4,90	5,40	7,90	8,87	9,80	10,40	10,93	12,77	14,23	14,87
	Región de prevención	mmol*sccm	-	0,02	0,11	0,26	0,41	0,63	0,81	1,60	2,53	3,53
MIBC en suspensión de concentrado de sulfuros de cobre Cp=6%	Concentración	mmol	0,00	0,03	0,06	0,10	0,13	0,17	0,20	0,30	0,40	0,50
	Prevención completa	sccm	4,57	4,97	7,17	8,60	9,37	9,87	10,27	12,50	12,93	14,53
	Prevención parcial	sccm	4,57	5,13	7,37	8,97	9,57	10,30	10,73	12,50	14,13	14,53
	Región de prevención	mmol*sccm	-	0,02	0,10	0,28	0,43	0,66	0,84	1,63	2,59	3,59

Tabla 21: Mediciones de flujos de aire a los que se produce coalescencia en sistemas trifásicos con partículas hidrofílicas (cuarzo) e hidrofóbicas (concentrado de sulfuros de cobre) a 1% y 6% de concentración en peso, usando PEG 300 como espumante.

Mezcla	Detalle	Unidades	Mediciones									
			0,00	0,03	0,06	0,10	0,13	0,17	0,20	0,30	0,40	0,50
PEG en Agua destilada	Concentración	mmol	0,00	0,03	0,06	0,10	0,13	0,17	0,20	0,30	0,40	0,50
	Prevención completa	sccm	4,87	5,23	5,23	5,93	6,93	7,50	8,10	9,77	10,77	11,63
	Región de prevención	mmol*sccm	-	0,01	0,02	0,06	0,13	0,23	0,33	0,82	1,41	2,09
PEG en suspensión de cuarzo Cp=1%.	Concentración	mmol	0,00	0,03	0,06	0,10	0,13	0,17	0,20	0,30	0,40	0,50
	Prevención completa	sccm	-	4,60	4,70	5,60	-	-	-	-	-	-
	Prevención parcial	sccm	4,53	5,00	5,00	6,13	6,97	7,47	7,87	9,47	10,53	11,10
	Región de prevención	mmol*sccm	-	0,01	0,03	0,09	0,17	0,28	0,38	0,88	1,47	2,13
PEG en suspensión de cuarzo Cp=6%.	Concentración	mmol	0,00	0,03	0,06	0,10	0,13	0,17	0,20	0,30	0,40	0,50
	Prevención completa	sccm	-	-	-	-	6,07	6,73	-	-	-	-
	Prevención parcial	sccm	4,67	4,57	4,63	5,17	6,23	6,97	7,33	9,33	9,90	10,47
	Región de prevención	mmol*sccm	-	0,00	0,00	0,03	0,08	0,17	0,26	0,73	1,27	1,86
PEG en suspensión de concentrado de sulfuros de cobre Cp=1%	Concentración	mmol	0,00	0,03	0,06	0,10	0,13	0,17	0,20	0,30	0,40	0,50
	Prevención completa	sccm	-	-	-	-	5,77	-	-	9,27	-	10,83
	Prevención parcial	sccm	4,33	4,43	4,43	5,33	6,00	6,97	7,27	9,27	10,27	10,83
	Región de prevención	mmol*sccm	-	0,00	0,01	0,05	0,10	0,20	0,29	0,78	1,38	2,03
PEG en suspensión de concentrado de sulfuros de cobre Cp=6%	Concentración	mmol	0,00	0,03	0,06	0,10	0,13	0,17	0,20	0,30	0,40	0,50
	Prevención completa	sccm	-	-	-	5,17	-	7,07	7,53	-	-	10,73
	Prevención parcial	sccm	3,77	3,83	4,07	5,47	6,73	7,23	7,73	9,03	10,07	10,73
	Región de prevención	mmol*sccm	-	0,00	0,01	0,08	0,17	0,31	0,43	0,95	1,58	2,28