



**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA**



**Estabilidad y coalescencia de burbujas en salmueras hiperconcentradas en una columna de burbujeo: Efecto del tipo y concentración de espumantes**

POR:

**Catalina Alejandra Rojas Rodríguez**

Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción para optar al título profesional de Ingeniera Civil Química

Profesores guías:

Pedro Toledo Ramírez

Jorge Saavedra Molina

Profesor comisión:

Fernando Márquez R.

Agosto 2023

Concepción (Chile)

©2023 Catalina Alejandra Rojas Rodríguez

---

## Resumen

La creciente escasez de agua, influenciada por el cambio climático y la demografía, es un problema global y especialmente severo en Chile, afectando sectores clave como la minería. En respuesta, la industria minera, recurre al agua de mar, bruta o parcialmente desalada, alterando la flotación de minerales. En este contexto, el trabajo se centrará en analizar el comportamiento de burbujas en soluciones acuosas con altas concentraciones de sal NaCl y espumante MIBC, buscando mejorar la eficiencia de los procesos de flotación y adaptarse a la creciente escasez de agua en la industria minera metálica y no metálica. Para ello, se llevaron a cabo cuatro series de experimentos, primero se estableció una línea base con agua desmineralizada. Luego, se analizó el impacto de distintas concentraciones de NaCl (0.3 M hasta 6 M), seguido de pruebas con diferentes concentraciones de MIBC (10, 20, 50, 100 ppm). Finalmente, se realizaron experimentos con una combinación de MIBC, en diferentes concentraciones (10, 20, 50, 100 ppm), y NaCl, en altas concentraciones (2 M, 4 M, y 6 M), para evaluar cómo estos dos factores interactúan y afectan la estabilidad de burbujas. Los experimentos se realizaron en una columna de burbujeo plana. Para cada solución, se grabaron y analizaron vídeos utilizando un algoritmo de seguimiento y análisis de burbujas en MATLAB, diseñado para rastrear el movimiento de las burbujas, detectar eventos de coalescencia y calcular tiempos correspondientes, además de identificar características individuales de las burbujas. Los resultados revelan que el diámetro de Sauter, el área de las burbujas y la frecuencia de coalescencia se estabilizan a 1 M de NaCl, a 50 ppm de MIBC, y a 20 ppm de MIBC en presencia de NaCl a concentraciones menores a 6 M. Se observó un aumento en los tiempos de coalescencia con mayores concentraciones de NaCl y MIBC, sugerido por una interacción electrostática y la capacidad surfactante del MIBC. Sin embargo, se observaron anomalías a 0.3 M y 6 M de NaCl. Aun así, se identificó una interacción sinérgica entre la sal y el espumante MIBC, mejorando la estabilidad interfacial y previniendo eficazmente la coalescencia. Los resultados ofrecen valiosas tendencias para procesos de flotación a escala industrial. Este estudio proporciona una base sólida para futuras investigaciones, destacando el potencial de mejorar los procesos de flotación y optimizar las prácticas en la industria minera.

---

## Abstract

The growing water scarcity, influenced by climate change and demographics, is a global issue and especially severe in Chile, affecting key sectors such as mining. In response, the mining industry turns to seawater, raw or partially desalinated, altering mineral flotation. In this context, the work will focus on analyzing the behavior of bubbles in aqueous solutions with high concentrations of NaCl salt and MIBC frother, seeking to improve the efficiency of flotation processes and adapt to the increasing water scarcity in the metallic and non-metallic mining industry. To this end, four series of experiments were carried out, first establishing a baseline with demineralized water. Then, the impact of different concentrations of NaCl (0.3 M up to 6 M) was analyzed, followed by tests with different concentrations of MIBC (10, 20, 50, 100 ppm). Finally, experiments were conducted with a combination of MIBC, at different concentrations (10, 20, 50, 100 ppm), and NaCl, at high concentrations (2 M, 4 M, and 6 M), to evaluate how these two factors interact and affect bubble stability. The experiments were conducted in a flat bubbling column. For each solution, videos were recorded and analyzed using a bubble tracking and analysis algorithm in MATLAB, designed to track the movement of the bubbles, detect coalescence events, and calculate corresponding times, as well as identify individual bubble characteristics. The results reveal that the Sauter diameter, the bubble area, and the coalescence frequency stabilize at 1 M of NaCl, at 50 ppm of MIBC, and at 20 ppm of MIBC in the presence of NaCl at concentrations less than 6 M. An increase in coalescence times was observed with higher concentrations of NaCl and MIBC, suggested by an electrostatic interaction and the surfactant capacity of MIBC. However, anomalies were observed at 0.3 M and 6 M of NaCl. Even so, a synergistic interaction between the salt and the MIBC frother was identified, improving interfacial stability and effectively preventing coalescence. The results offer valuable trends for industrial-scale flotation processes. This study provides a solid foundation for future research, highlighting the potential to improve flotation processes and optimize practices in the mining industry.

---

## Agradecimientos

Primero que nada, me gustaría expresar mi profundo agradecimiento a mis profesores Pedro Toledo y Jorge Saavedra. Su continua orientación, apoyo y estímulo fueron fundamentales en la realización de esta memoria de título. Siempre estuvieron dispuestos a ayudarme y aconsejarme, y por ello, les estaré eternamente agradecida.

No puedo dejar de mencionar a mis queridos padres, quienes han sido un faro de apoyo en mi vida. A mi papá, por estar siempre allí cuando necesite ayuda o guía, por su amor incondicional y por creer en mí cuando yo mismo lo dude. A mi mamá, por su amor y cariño constantes, que han sido el motor que me ha impulsado a seguir adelante en los momentos más difíciles. Su fe inquebrantable en mí ha sido la base de mi perseverancia.

Un sincero agradecimiento a mis amigos, que han estado a mi lado durante este viaje. Su compañía y apoyo han hecho este camino mucho más llevadero. Son una parte importante de este logro y comparto con ustedes la alegría de este éxito.

Por último, pero no menos importante, quiero expresar mi gratitud al Centro de Recursos Hídricos para la Agricultura y la Minería (CRHIAM, proyecto ANID/FONDAP/15130015), al proyecto ANID/FONDECYT/11171092 y al proyecto ANID/FSEQ/210002. Su apoyo financiero ha sido esencial para llevar a cabo este trabajo y para mi crecimiento personal y académico. Su contribución ha hecho posible que este proyecto se haga realidad.

---

# Tabla de Contenidos

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2. Objetivos</b>	<b>3</b>
2.1. Objetivo general . . . . .	3
2.2. Objetivos específicos . . . . .	3
<b>3. Marco teórico</b>	<b>4</b>
3.1. Flotación de minerales . . . . .	4
3.2. Reactivos de flotación . . . . .	4
3.3. Técnicas de estudio de estabilidad de burbujas . . . . .	5
3.3.1. Coalescencia de burbuja . . . . .	5
3.3.2. Tamaño de burbuja . . . . .	5
3.3.3. Concentración crítica de coalescencia . . . . .	6
3.3.4. Tiempo de coalescencia . . . . .	7
3.4. Estado del arte . . . . .	7
3.5. Estudios en columnas de burbujeo . . . . .	10
<b>4. Metodología</b>	<b>21</b>
4.1. Materiales y equipos . . . . .	21
4.1.1. Materiales . . . . .	21
4.1.2. Instrumentos . . . . .	22
4.1.3. Montaje experimental . . . . .	22
4.2. Procedimiento experimental . . . . .	24
4.2.1. Preparación de soluciones . . . . .	24
4.2.2. Condiciones de operación . . . . .	25
4.2.3. Procedimiento de lavado . . . . .	26
4.2.4. Análisis de imágenes . . . . .	27
4.2.5. Procesamiento de datos y análisis de resultados . . . . .	30
4.2.6. Ajuste del umbral de binarización . . . . .	31
<b>5. Resultados y discusión</b>	<b>33</b>

---

5.1. Influencia del umbral de binarización en la determinación de eventos y tiempos de coalescencia . . . . .	33
5.2. Cantidad de burbujas . . . . .	36
5.3. Diámetro de burbuja . . . . .	39
5.4. Área de burbuja . . . . .	41
5.5. Frecuencia de eventos de coalescencia . . . . .	42
5.6. Tiempos de coalescencia . . . . .	44
5.7. Análisis físico-químico . . . . .	46
<b>6. Conclusiones</b>	<b>50</b>
<b>7. Recomendaciones</b>	<b>51</b>
<b>8. Referencias</b>	<b>52</b>
<b>A. Anexos</b>	<b>56</b>
A.1. Protocolo de preparación de muestras . . . . .	56

## Lista de Tablas

3.1. Valores de la CCC en espumantes obtenidos por <a href="#">Peña (2021)</a> . . . . .	11
3.2. Valores de DFI para espumantes en estudio obtenidos por <a href="#">Peña (2021)</a> . . . . .	12
3.3. Balance poblacional de burbujas obtenido por <a href="#">Ulloa (2022)</a> . . . . .	15
4.1. Características de espumantes y solventes utilizados. . . . .	21
4.2. Recipientes e instrumentos y sus capacidades. . . . .	22
4.3. Instrumentos auxiliares. . . . .	22
4.4. Total de pruebas realizadas. . . . .	25

## Lista de Figuras

3.1. Diagrama esquemático del efecto de la concentración del agente espumante sobre el tamaño de las burbujas en una celda de flotación ( <a href="#">Melo y Laskowski, 2006</a> ). . . . .	6
---	---

---

3.2. Efecto de la dosificación de espumantes sobre el diámetro promedio de burbujas obtenido por <b>Peña (2021)</b> . . . . .	11
3.3. Efecto de la dosificación de espumantes sobre el diámetro promedio de burbujas obtenido por <b>Peña (2021)</b> . . . . .	12
3.4. Área promedio de burbuja en función de la altura en la columna <b>(a)</b> , diámetro de Sauter en función de la altura en la columna <b>(b)</b> , circularidad de burbuja en función de la altura en la columna <b>(c)</b> . Resultados obtenidos por <b>Ulloa (2022)</b> . . . . .	14
3.5. Velocidad promedio de burbuja en función de la altura en la columna obtenido por <b>Ulloa (2022)</b> . . . . .	15
3.6. Densidad promedio de burbuja en función de la altura en la columna obtenido por <b>Ulloa (2022)</b> . . . . .	15
3.7. Frecuencia de coalescencia en diferentes soluciones obtenido por <b>Ulloa (2022)</b> . . . . .	16
3.8. Áreas de burbujas generadas obtenido por <b>Solar (2022)</b> . . . . .	17
3.9. Tiempos de coalescencia obtenido por <b>Solar (2022)</b> . . . . .	18
3.10. Coalescencias detectadas para el total de videos, para 0 ppm de MIBC <b>(A)</b> , 20 ppm de MIBC <b>(B)</b> , 50 ppm de MIBC <b>(C)</b> , 100 ppm de MIBC <b>(D)</b> . Resultados obtenidos por <b>Solar (2022)</b> . . . . .	19
3.11. Tiempos de coalescencia a medida que aumenta la superficie de contacto obtenido por <b>Solar (2022)</b> . . . . .	20
4.1. Esquema columna de burbujeo. Fuente: Elaboración propia. . . . .	23
4.2. Recorte de cada video. . . . .	28
4.3. Diagrama de flujo del proceso de análisis de vídeo. . . . .	28
5.1. Variación de los eventos de coalescencia a medida que se aumenta el umbral de binarización. . . . .	34
5.2. Fotogramas de 10 ppm con umbrales de 0.46 <b>(a)</b> , 0.47 <b>(b)</b> , 0.48 <b>(c)</b> y 0.49 <b>(d)</b> . . . . .	35
5.3. Variación de los tiempos de coalescencia a medida que aumenta el umbral de binarización. . . . .	36
5.4. Variación de los tiempos de coalescencia a medida que aumenta el umbral de binarización. . . . .	36
5.5. Esquema de la celda de burbujeo, destacando el rango de análisis utilizado por el código. Fuente: Elaboración propia. . . . .	37

---

5.6. Promedio de la cantidad de burbujas a diferentes concentraciones de NaCl. . . . .	38
5.7. Promedio de la cantidad de burbujas a diferentes concentraciones de MIBC en soluciones sin y con NaCl. . . . .	38
5.8. Promedio del diámetro de Sauter a diferentes concentraciones de NaCl. . . . .	40
5.9. Promedio del diámetro de Sauter a diferentes concentraciones de MIBC en soluciones sin y con NaCl. . . . .	40
5.10. Promedio de las áreas de burbujas a diferentes concentraciones de NaCl. . . . .	42
5.11. Promedio de las áreas de burbujas a diferentes concentraciones de MIBC en soluciones sin y con NaCl. . . . .	42
5.12. Frecuencia promedio de los eventos de coalescencia a diferentes concentraciones de NaCl. . . . .	43
5.13. Frecuencia promedio de los eventos de coalescencia a diferentes concentraciones de MIBC en soluciones sin y con NaCl. . . . .	44
5.14. Promedio de los tiempos de coalescencia a diferentes concentraciones de NaCl. . . . .	45
5.15. Promedio de los tiempos de coalescencia a diferentes concentraciones de MIBC en soluciones sin y con NaCl. . . . .	46

---

# 1. Introducción

La escasez de agua es un problema creciente que afecta tanto a nivel global como a nivel local en varios países, incluido Chile. Esta situación se debe a múltiples factores, como el cambio climático, el crecimiento demográfico, la sobreexplotación de recursos hídricos y la contaminación del agua. La escasez de agua no sólo representa un desafío para la sostenibilidad ambiental, sino que también afecta la salud humana, la seguridad alimentaria y el desarrollo económico.

Según la ONU, aproximadamente 4.000 millones de personas en todo el mundo sufren escasez grave de agua ([United Nations Educational, 2019](#)). Además, según un informe de la UNESCO publicado en 2023, 2.000 millones de personas en todo el mundo no tienen acceso a agua potable y 3.600 millones no tienen acceso a saneamiento gestionado de forma segura ([UNESCO, 2023](#)).

En el caso de Chile, la situación es especialmente preocupante debido a la variabilidad climática y la distribución desigual de los recursos hídricos en su territorio. A lo largo de la última década, el país ha experimentado una de las sequías más severas en su historia, con consecuencias devastadoras para la agricultura, la generación de energía hidroeléctrica y el suministro de agua potable en algunas áreas ([Garreaud et al., 2017](#)).

En línea con lo anterior, las actividades que más consumen agua son la agricultura y la minería ([Aitken et al., 2016](#)). La minería es una de las principales industrias del país y utiliza grandes cantidades de agua en sus procesos, especialmente en la flotación, un proceso crucial para la separación de minerales ([Wills y Finch, 2016](#)). La búsqueda de nuevas fuentes de agua, como el agua de mar, es esencial para garantizar la sostenibilidad del sector minero sin competir con la agricultura y otros usos del agua.

El estudio de la estabilidad y coalescencia de las burbujas en presencia de espumantes y electrolitos es fundamental para optimizar el proceso de flotación y entender cómo se comporta este proceso en presencia de diferentes fuentes de agua, como el agua de mar ([Grau y Heiskanen, 2005](#)). Si bien existen investigaciones sobre los efectos de las sales en la estabilidad de las burbujas ([Farrokhpay, 2011](#)), aún no se han abordado adecuadamente los efectos de altas concentraciones de sal, las cuales son comunes en la minería de litio.

El litio, un elemento químico crucial en la fabricación de baterías recargables, ha adquirido gran importancia en la industria global y en Chile ([Tarascon y Armand, 2001](#)). Su uso en baterías de iones

---

de litio ha impulsado el desarrollo de tecnologías como vehículos eléctricos y sistemas de almacenamiento de energía renovable, facilitando una transición hacia un futuro más sostenible (Dunn et al., 2011). Chile, siendo uno de los principales productores de litio y hogar del Salar de Atacama (Kessler et al., 2012), desempeña un papel clave en la industria de energías limpias y tecnologías verdes, generando importantes ingresos para el país (Maxwell y Mora, 2020). Por lo tanto, investigar el impacto de las altas concentraciones de sal en la estabilidad y coalescencia de burbujas es esencial para mejorar la eficiencia del proceso de flotación en la minería del litio y, en última instancia, adaptarse a la utilización de nuevas fuentes de agua en la industria.

En este contexto, el presente trabajo se enfocará en estudiar los efectos de altas concentraciones de sal (NaCl) en la estabilidad y coalescencia de burbujas en presencia del espumante MIBC mediante la captura y análisis de imágenes secuenciales, con el objetivo de contribuir al conocimiento y optimización de los procesos de flotación en la minería del litio, especialmente en el uso de nuevas fuentes de agua.

---

## **2. Objetivos**

### **2.1. Objetivo general**

Estudiar el efecto de altas concentraciones de sal en la estabilidad y coalescencia de burbujas en una columna de burbujeo mediante la captura y análisis de imágenes secuenciales.

### **2.2. Objetivos específicos**

- Optimizar una columna de burbujeo existente.
- Capturar videos de sistema de burbujas.
- Determinar los tamaños de burbuja, eventos de coalescencia y tiempos de coalescencia.
- Formular mecanismo que permitan explicar el efecto de la alta concentración de sal sobre la estabilidad interfacial.

---

## 3. Marco teórico

### 3.1. Flotación de minerales

La flotación de minerales es un proceso físico-químico que se utiliza para separar selectivamente los minerales valiosos de los minerales no deseados. En este proceso, se agita la pulpa mineral en presencia de reactivos de flotación, como colectores y espumantes, que hacen que las partículas de mineral se adhieran a las burbujas de aire y formen una espuma. La espuma se recoge en la parte superior del tanque de flotación y se retira como concentrado, mientras que los minerales no deseados permanecen en la pulpa y se descargan como relaves. La flotación es ampliamente utilizada en la industria minera para procesar una variedad de minerales, incluyendo sulfuros, óxidos y silicatos. La eficacia del proceso depende de varios factores, como la concentración y el tipo de agente espumante, el tamaño y la hidrofobicidad de las partículas minerales y las condiciones hidrodinámicas (Bulatovic, 2007).

### 3.2. Reactivos de flotación

Los reactivos de flotación son sustancias químicas utilizadas en el proceso de flotación de minerales para hacer que los minerales hidrófobos se adhieran a las burbujas de aire y se separen de los minerales hidrófilos en una solución acuosa. Estos reactivos se dividen en tres tipos principales: colectores, espumantes y modificadores de pH.

- **Colectores:** Los colectores son reactivos de flotación que se utilizan para mejorar la selectividad del proceso de flotación al hacer que las partículas minerales se adhieran a las burbujas de aire. Los colectores son moléculas orgánicas que tienen una afinidad por las superficies de los minerales valiosos. Cuando se agregan al agua, los colectores se adsorben en la superficie de los minerales valiosos y forman una capa hidrofóbica. Esta capa hidrofóbica repele el agua y atrae las burbujas de aire, lo que hace que las partículas minerales se adhieran a las burbujas y floten hacia la superficie para su recolección. Los tipos comunes de colectores incluyen xantatos, tiocarbamatos, ditiofosfatos y mercaptanos (Bulatovic, 2007).
- **Espumantes:** Los espumantes son reactivos de flotación que se utilizan para estabilizar la espuma y mejorar la selectividad del proceso de flotación. Los espumantes reducen la tensión

---

superficial del líquido, lo que permite que las burbujas de aire se formen y se mantengan en la superficie de la pulpa. Esto ayuda a separar los minerales valiosos de los minerales no deseados, ya que las burbujas de aire atrapan los minerales valiosos y los llevan a la superficie para su recolección. Los espumantes también pueden mejorar la selectividad del proceso de flotación al reducir el arrastre de partículas no deseadas en la espuma. Los tipos comunes de espumantes incluyen alcoholes, glicoles, éteres y aceites (Bulatovic, 2007).

- **Modificadores de pH:** Los modificadores de pH son reactivos de flotación que se utilizan para regular la composición iónica de la pulpa mediante el cambio de la concentración del ion hidrógeno en la pulpa. Esto resulta en una mejora en la interacción del colector con el mineral seleccionado y reduce la interacción del colector con los minerales no deseados. Los modificadores de pH también pueden actuar como depresores al mismo tiempo (Bulatovic, 2007).

Es importante destacar que el uso de los reactivos de flotación depende de las características del mineral que se está procesando y del tipo de flotación que se está realizando.

### **3.3. Técnicas de estudio de estabilidad de burbujas**

#### **3.3.1. Coalescencia de burbuja**

La coalescencia es un proceso en el cual dos o más burbujas se unen para formar una burbuja más grande. En la flotación por espuma, la coalescencia de las burbujas puede perjudicar el proceso de separación al disminuir su eficacia. La coalescencia puede ser ocasionada por varios factores, como la insuficiente presencia de agente espumante, la existencia de partículas sólidas en el agua y las fuerzas hidrodinámicas. Por lo tanto, es fundamental controlar y minimizar la coalescencia durante el proceso de flotación por espuma, con el fin de alcanzar una separación efectiva.

#### **3.3.2. Tamaño de burbuja**

El tamaño de las burbujas es un factor importante en la eficacia de la flotación de minerales. Las burbujas más pequeñas tienen una mayor área superficial en comparación con las burbujas más grandes, lo que les permite adherirse mejor a las partículas minerales y aumentar la eficiencia de la flotación. Además, las burbujas más pequeñas pueden penetrar en las capas más profundas del lecho mineralizado, lo que aumenta la probabilidad de que se adhieran a los minerales y se separen del material no

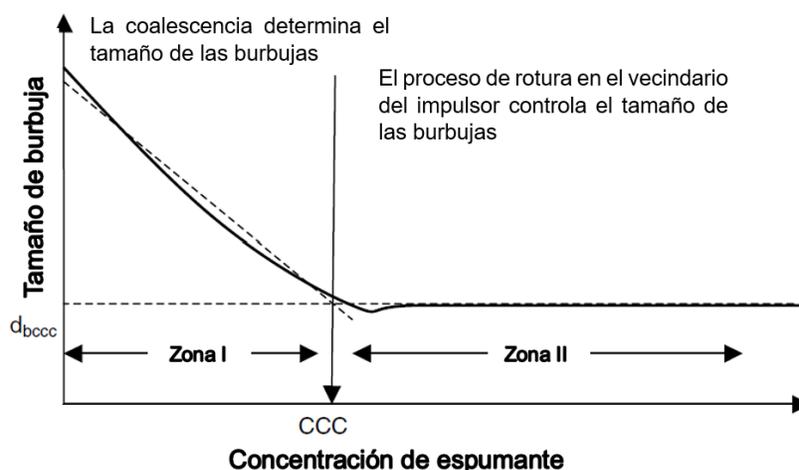
deseado.

Existen varias técnicas para medir el tamaño de burbuja en la flotación de minerales, que se clasifican según sus principios de funcionamiento. El método más comúnmente utilizado es el análisis de imágenes, que implica tomar fotografías o videos de las burbujas y analizarlos utilizando software especializado para medir el tamaño y la forma de las burbujas. Otros métodos incluyen el análisis acústico, el análisis óptico y la técnica electroquímica.

El tamaño de burbuja puede ser representado por el diámetro de Sauter, el cual es una medida del diámetro promedio de las burbujas en una solución de flotación de minerales. El diámetro de Sauter se define como el diámetro de la esfera que tendría el mismo volumen que el total de las burbujas en la solución.

### 3.3.3. Concentración crítica de coalescencia

La concentración crítica de coalescencia (CCC) es un valor obtenido al evaluar el efecto de los agentes espumantes en el tamaño de las burbujas. Esta concentración hace referencia al mínimo de agente espumante requerido para prevenir por completo la coalescencia de las burbujas. En otras palabras, una vez que se alcanza la CCC, el agente espumante es suficientemente efectivo como para evitar la unión de las burbujas y la formación de burbujas más grandes. La CCC se puede determinar mediante pruebas experimentales y se utiliza para evaluar la eficacia de diversos agentes espumantes en la flotación por espuma.



**Figura 3.1:** Diagrama esquemático del efecto de la concentración del agente espumante sobre el tamaño de las burbujas en una celda de flotación (Melo y Laskowski, 2006).

---

### 3.3.4. Tiempo de coalescencia

El tiempo de coalescencia es un parámetro importante en la flotación de minerales que mide el tiempo que dos o más burbujas tardan en unirse y formar una burbuja más grande. Este tiempo puede variar dependiendo de varios factores, tales como la concentración de agentes espumantes, la presencia de partículas sólidas y las condiciones hidrodinámicas.

Además, el tiempo de coalescencia puede ser un factor importante en la recuperación de partículas finas de mineral. En este caso, las burbujas deben ser lo suficientemente estables para transportar los minerales hasta la superficie de la solución, donde pueden ser recolectados. Si el tiempo de coalescencia es demasiado corto, las burbujas se unirán antes de que puedan transportar los minerales a la superficie, lo que reducirá la eficiencia de la flotación. Por lo tanto, es importante controlar y ajustar el tiempo de coalescencia para lograr una separación y recuperación efectivas de los minerales durante la flotación por espuma.

## 3.4. Estado del arte

El presente capítulo tiene como objetivo presentar una revisión de la literatura existente sobre el efecto de la sal en el proceso de flotación, y discutir los avances y desafíos en la implementación del agua de mar en la minería. Además, se hará especial énfasis en el efecto del NaCl en la estabilidad de la burbuja, ya que es uno de los principales componentes de la sal presente en el agua de mar. Al comprender cómo la sal afecta la estabilidad y espumabilidad de la espuma, se podrán desarrollar tecnologías y prácticas de flotación más efectivas y eficientes que permitan el uso del agua de mar en la minería sin comprometer la calidad del proceso de flotación.

En línea con este enfoque, [Bournival et al. \(2012\)](#), examinó la efectividad del NaCl y el MIBC como inhibidores de la coalescencia de burbujas en la flotación por espuma para separar minerales valiosos de los residuos. El aparato experimental que utilizaron estaba diseñado para permitir la observación de pares de burbujas producidas por capilares. En sus experimentos, se midió la estabilidad de las burbujas en diferentes concentraciones de NaCl y MIBC, así como el tamaño de las burbujas y la concentración de espumantes. Los resultados mostraron que la adición de NaCl y MIBC mejoró significativamente la estabilidad de las burbujas, reduciendo la coalescencia y aumentando la eficiencia de la flotación. Además, la combinación de NaCl y MIBC tuvo un efecto sinérgico en la inhibición de

---

la coalescencia.

**Pan et al. (2022)** también investigó los efectos sinérgicos de los agentes químicos en la estabilidad de las burbujas de aire en el proceso de flotación de minerales. Para ello, se utilizaron pares de burbujas en las pruebas experimentales. Se encontró que la combinación de ciertos espumantes, colectores y sales, como el NaCl, puede mejorar significativamente la estabilidad de las burbujas de aire y, por lo tanto, aumentar la eficiencia de la flotación.

**Del Castillo et al. (2011)** investigó la influencia de la concentración de sal y la velocidad de aproximación en la coalescencia de burbujas en sistemas acuosos, con el objetivo de entender cómo estas variables afectan la estabilidad de las burbujas. Los resultados mostraron que la adición de sal a una solución acuosa reduce significativamente la coalescencia de burbujas, y que la velocidad de aproximación también influye en la coalescencia. Se observó que la estabilidad de las burbujas aumenta a medida que la concentración de sal aumenta y la velocidad de aproximación disminuye. La adición de tensioactivos también puede aumentar aún más la estabilidad de las burbujas en soluciones con sal.

En otro estudio, **Castro et al. (2013)** evaluó el efecto de diferentes tipos de espumantes en la coalescencia de burbujas y la formación de espuma en soluciones electrolíticas y agua de mar. Para la observación del comportamiento de las burbujas, se utilizaron dos métodos generales. El primero consistió en observar el comportamiento de una sola burbuja que se acerca a la superficie líquida. El segundo método consistió en observar el comportamiento de un par de burbujas controladas, montándolas en los extremos de capilares y presionándolas juntas. Se encontró que los espumantes con grupos químicos de éter fueron más efectivos para prevenir la coalescencia de burbujas en soluciones electrolíticas y agua de mar. Además, la presencia de electrolitos puede reducir la eficacia de los espumantes y aumentar la velocidad de ascenso de las burbujas. Estos hallazgos son importantes para mejorar la eficiencia y la calidad de los procesos de separación, especialmente en ambientes de agua de mar y soluciones electrolíticas.

En un trabajo reciente, **Peña (2021)** se centró en evaluar la estabilidad de burbujas y espuma de soluciones acuosas de espumantes utilizados en la industria minera mediante una columna de burbujeo de espesor delgado. Se diseñó una columna de burbujeo delgada que permitió visualizar directamente las burbujas y las fases involucradas en el sistema. Se concluyó que el desarrollo del diseño de esta columna permitió la rápida evaluación de tamaños de burbuja, CCC y DFI de soluciones acuosas de

---

espumantes con cantidades muy inferiores a las utilizadas frecuentemente en este tipo de experimentos. Además, se encontró que los espumantes presentan capacidad para prevenir la coalescencia de burbujas, donde a mayor cadena hidrocarbonada en su estructura química, menor son los eventos de coalescencia.

En otro trabajo, [Solar \(2022\)](#) logró implementar con éxito un código computacional capaz de reconocer múltiples burbujas en un sistema dinámico de burbujeo, identificando automáticamente eventos de coalescencia y determinando los tiempos de coalescencia. Para este propósito, se utilizó una columna de burbujeo de múltiples burbujas. La información generada proporciona facilidades para realizar análisis a la coalescencia de burbujas en sistemas dinámicos, para agua pura y diferentes concentraciones de MIBC. Los valores determinados en la relación entre tiempo de coalescencia y velocidades de acercamiento para las burbujas muestran concordancia con los valores reportados en literatura. Además, se presentan gráficos que muestran la distribución temporal del tamaño y velocidad de las burbujas, así como la relación entre el tiempo de coalescencia y otras propiedades geométricas de las burbujas. Sin embargo, se mencionan algunas limitaciones del método utilizado, como que solo se aplica a sistemas de burbujeo en condiciones controladas y depende del espumante utilizado.

Actualmente, la mayoría de las investigaciones se han enfocado en el efecto de la sal en la estabilidad de las burbujas en la flotación por espuma en concentraciones de hasta 4 molar ([Bournival et al., 2012](#), [Castro et al., 2013](#), [Pan et al., 2022](#)). Sin embargo, es importante destacar que las altas concentraciones de sal, en particular en la minería no metálica, pueden tener un impacto significativo en la estabilidad de las burbujas y aún no se han explorado en profundidad.

Además, es importante tener en cuenta que el efecto de la sal en la estabilidad de las burbujas puede verse influenciado por otros factores como la temperatura, el pH y la presencia de otros iones en la solución. En particular, la presencia de iones metálicos en la solución puede tener un impacto significativo en la eficacia de la sal en la estabilidad de las burbujas. Por lo tanto, es necesario investigar cómo la presencia de diferentes iones metálicos en la solución puede afectar la eficacia de la sal en la estabilidad de las burbujas.

Asimismo, otro aspecto importante a considerar en la flotación por espuma es la selección adecuada de los surfactantes y espumantes, ya que estos compuestos pueden interactuar con la sal presente en la solución y afectar su efectividad en la estabilidad de las burbujas. Por lo tanto, se necesitan estudios

---

que exploren la interacción de los surfactantes y espumantes con la sal en la solución y cómo esto puede afectar la estabilidad de las burbujas.

En resumen, si bien se han realizado avances significativos en la comprensión del efecto de la sal en la estabilidad de las burbujas en la flotación por espuma, todavía hay mucho por investigar, especialmente en lo que respecta a las altas concentraciones de sal y la presencia de otros iones metálicos en la solución. Además, es importante considerar la interacción de los espumantes con la sal en la solución al seleccionar los compuestos adecuados para la flotación por espuma en condiciones salinas.

### **3.5. Estudios en columnas de burbujeo**

En el contexto de la investigación y desarrollo de la celda de burbujeo, diversos estudios previos han aportado un conocimiento significativo. Esta subsección se enfocará en los trabajos de [Peña \(2021\)](#), [Ulloa \(2022\)](#) y [Solar \(2022\)](#), cuyas memorias de título han contribuido de manera significativa a esta área de investigación.

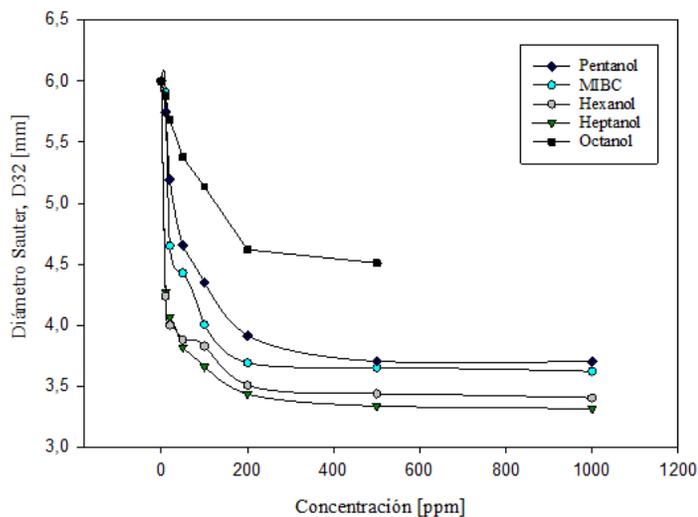
Peña en su memoria de título, abordó la investigación centrada en la evaluación de la estabilidad de burbujas y espuma de soluciones acuosas de agentes espumantes. Este estudio se llevó a cabo en ausencia y presencia de NaCl, y se empleó una columna de burbujeo de espesor delgado a escala de laboratorio.

La columna que utilizó para su investigación fue de diseño específico: una estructura rectangular y delgada fabricada en vidrio, con dimensiones internas de 600 mm de altura, 100 mm de longitud y 4 mm de ancho. Se colocó en la base de la columna un difusor de gases, que constaba de 10 capilares distribuidos a lo largo de la anchura de la celda. Cada capilar, con un diámetro interno de 0.4 mm, estaba espaciado a 5 mm de distancia uno de otro.

Lo innovador de su diseño fue que cada capilar estaba conectado a una válvula individual, lo que permitía controlar el flujo de gas a través de cada uno de manera independiente. Esta metodología de [Peña \(2021\)](#) permitió obtener resultados más precisos y controlados durante la fase de evaluación de la estabilidad de burbujas y espuma.

Peña realizó una serie de experimentos para estudiar el efecto de diferentes espumantes y su concentración en el tamaño de las burbujas, la prevención de coalescencia y la estabilidad de la espuma en la flotación. Se determinó el diámetro de Sauter y se identificó que a medida que aumenta la concentra-

ción de espumantes, este diámetro tiende a reducirse y luego se estabiliza. Tal como se aprecia en la **Figura 3.2**.

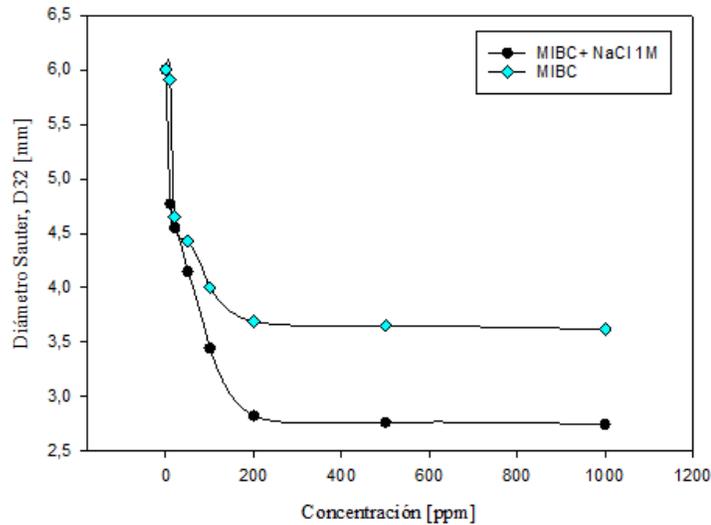


**Figura 3.2:** Efecto de la dosificación de espumantes sobre el diámetro promedio de burbujas obtenido por **Peña (2021)**.

El análisis de la concentración crítica de coalescencia (CCC) reveló que la estructura molecular de los espumantes juega un papel importante en la prevención de la coalescencia, y que el heptanol y octanol presentaron una mayor capacidad en comparación con los otros espumantes estudiados, tal como se ve en la **Tabla 3.1**. Además, en los resultados de la **Figura 3.3** se observó que la adición de NaCl a una solución de MIBC contribuyó a una disminución en el diámetro medio de las burbujas.

**Tabla 3.1:** Valores de la CCC en espumantes obtenidos por **Peña (2021)**.

Espumantes	CCC [ppm]
Pentanol	180.38
MIBC	119.64
Hexanol	178.31
Heptanol	99.45
Octanol	100.71



**Figura 3.3:** Efecto de la dosificación de espumantes sobre el diámetro promedio de burbujas obtenido por Peña (2021).

El estudio también se centró en el índice de espumabilidad dinámica (DFI), determinado por el tiempo de retención a diferentes concentraciones de espumante. Se observó que a medida que aumentaba la dosis de espumante, el tiempo de retención tendía a ser constante. Aquí, el octanol y heptanol mostraron los valores más altos de DFI, lo que sugiere una mayor estabilidad de la espuma. Sin embargo, estos espumantes pueden presentar dificultades en el uso industrial debido a la falta de control de la generación de espuma y a los altos costos asociados. Los valores específicos de DFI para cada espumante se pueden encontrar en la **Tabla 3.2**.

**Tabla 3.2:** Valores de DFI para espumantes en estudio obtenidos por Peña (2021).

Espumantes	DFI [s*L/mol]
Pentanol	8289
MIBC	10255
Hexanol	10148
Heptanol	14899
Octanol	21357

De todos los espumantes estudiados, Peña identificó que el MIBC es el más beneficioso para el proceso de flotación debido a su estabilidad de espuma y tamaño de burbuja consistente, siendo favorable para la recuperación de minerales valiosos en la industria metalúrgica. Finalmente, Peña concluyó que las aguas con electrolitos serían favorables para el proceso de flotación, y que los espumantes con cadenas hidrocarbonadas más largas son más eficaces para prevenir la coalescencia de burbujas. En último

---

lugar, se estableció un método efectivo para evaluar y estudiar a escala de laboratorio la estabilidad de la burbuja y la espuma de las soluciones acuosas de espumantes, tanto en ausencia como en presencia de NaCl, que se utilizan en la industria minera.

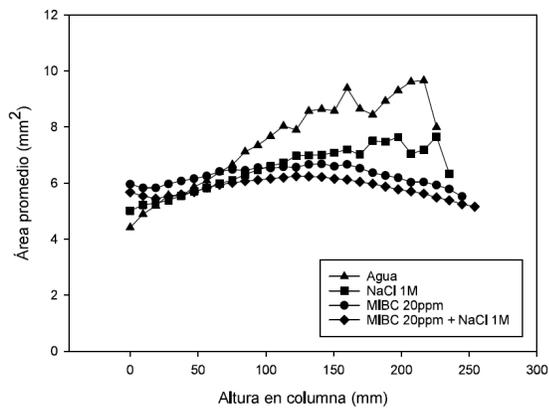
Por su parte [Ulloa \(2022\)](#) llevó a cabo un estudio centrado en analizar el comportamiento de burbujas en soluciones acuosas de MIBC y NaCl utilizando un sistema dinámico de burbujeo en una columna de pared delgada, en línea con el diseño experimental propuesto por [Peña \(2021\)](#).

En el estudio exploró varios aspectos del comportamiento de las burbujas y su interacción con las soluciones de MIBC y NaCl. Respecto al tamaño de las burbujas, se observó que la presencia de MIBC y NaCl en la solución resultaba en una disminución en el tamaño medio de las burbujas, tanto en términos de área como de diámetro. Además, se encontró que las burbujas en las soluciones de MIBC y NaCl eran más circulares en comparación con las burbujas en agua pura, lo que indica una mayor estabilidad y un menor riesgo de coalescencia, tal como se ve en la [Figura 3.4](#).

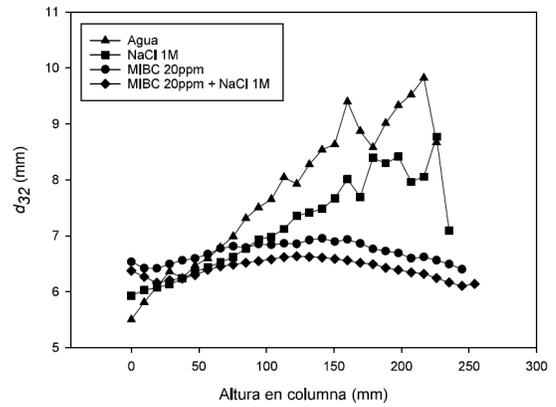
El estudio evidenció que la presencia de MIBC en la solución resultó en una disminución en la velocidad de ascenso de las burbujas, tal como se muestra en la [Figura 3.5](#). Este comportamiento se atribuyó a un aumento en el espesor de la película de las burbujas y a una reducción en la movilidad de la superficie.

En la [Figura 3.6](#), se mostró la densidad poblacional de burbujas a lo largo de la altura de la columna. Los resultados revelaron que la presencia de MIBC y NaCl contribuyó a la disminución de la coalescencia de burbujas. Esto se reflejó en que, para estos casos, la densidad poblacional de burbujas se mantuvo más estable que en el caso de burbujas en agua pura.

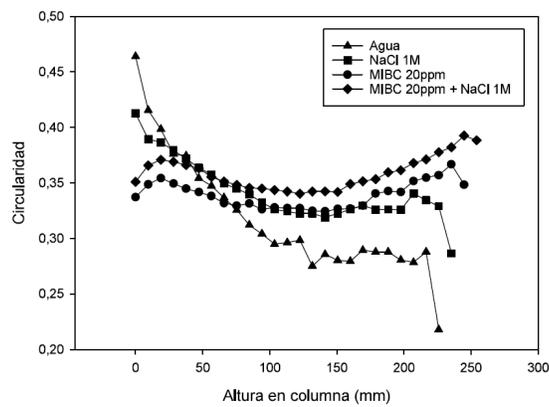
Se observaron diferencias significativas en el balance poblacional, como se muestra en la [Tabla 3.3](#). Entre el flujo de burbujas de entrada y salida para la solución de agua, la diferencia fue considerable. La diferencia fue menor, pero aún significativa, para la solución de NaCl 1 M. En cambio, las soluciones con MIBC mantuvieron un flujo similar de entrada y salida de burbujas. Esto evidenció la capacidad del MIBC para estabilizar las burbujas y prevenir su coalescencia o ruptura durante su ascenso.



(a)

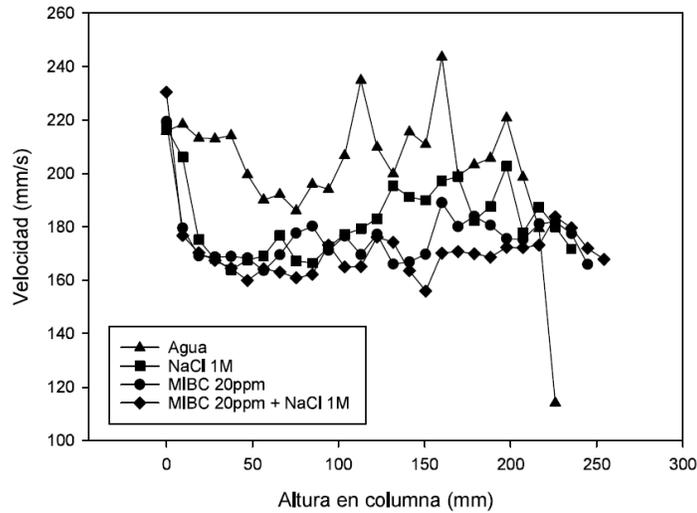


(b)

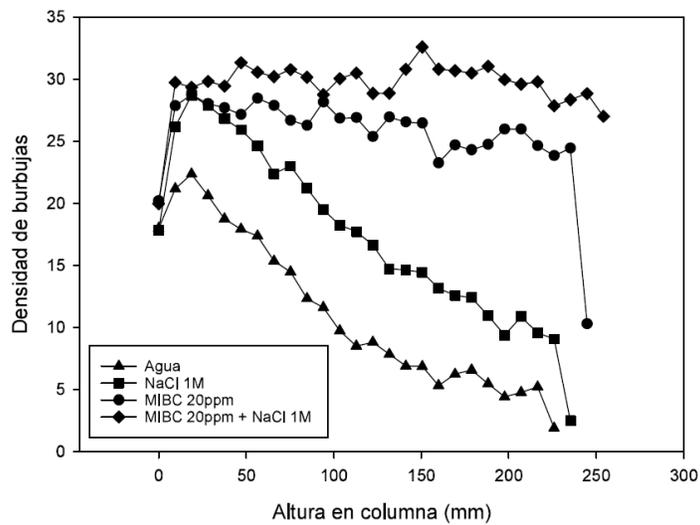


(c)

**Figura 3.4:** Área promedio de burbuja en función de la altura en la columna (a), diámetro de Sauter en función de la altura en la columna (b), circularidad de burbuja en función de la altura en la columna (c). Resultados obtenidos por [Ulloa \(2022\)](#).



**Figura 3.5:** Velocidad promedio de burbuja en función de la altura en la columna obtenido por [Ulloa \(2022\)](#).



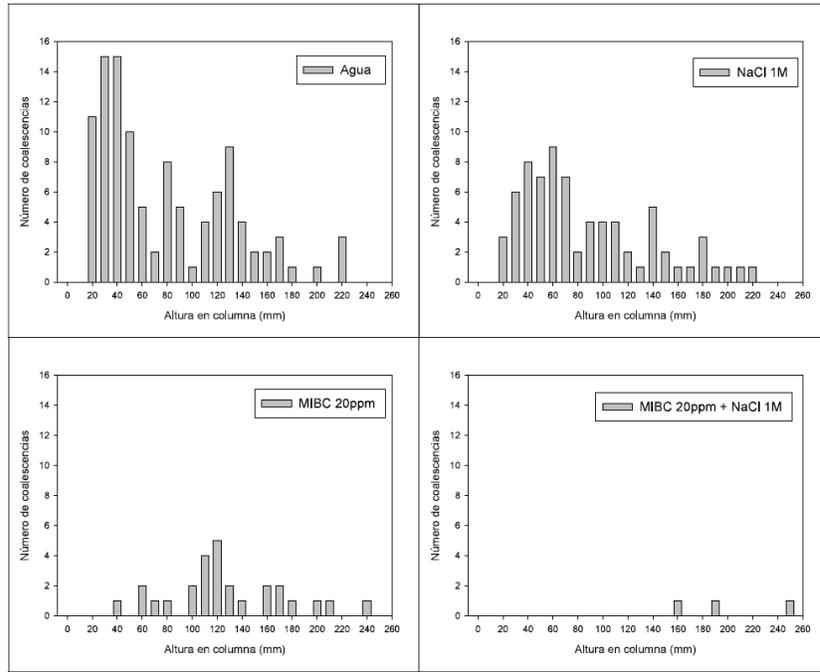
**Figura 3.6:** Densidad promedio de burbuja en función de la altura en la columna obtenido por [Ulloa \(2022\)](#).

**Tabla 3.3:** Balance poblacional de burbujas obtenido por [Ulloa \(2022\)](#).

	Unidad	Entrada	Salida	Generación	Consumo
Agua	burbujas/s	500	206	66	74
NaCl 1 M	burbujas/s	507	271	33	47
MIBC 20 ppm	burbujas/s	495	472	11	16
MIBC 20 ppm NaCl 1 M	burbujas/s	510	508	6	6

Finalmente, en lo que respecta a la frecuencia de coalescencias, se descubrió, tal como se ilustra en la [Figura 3.7](#), que esta varía en los sistemas con y sin MIBC. En el agua y la solución de NaCl 1

M, se halló que la frecuencia de coalescencias es mayor en los primeros milímetros de la columna y disminuía a medida que las burbujas ascienden. Sin embargo, en la solución de MIBC, se encontró que la mayoría de las coalescencias ocurren en la mitad de la celda.



**Figura 3.7:** Frecuencia de coalescencia en diferentes soluciones obtenido por [Ulloa \(2022\)](#).

El estudio concluyó que la presencia de espumante y sal en el sistema influye significativamente en las propiedades de las burbujas. Los sistemas sin espumante y sal mostraron la mayor variación en estas propiedades, así como un mayor número de eventos de coalescencia y ruptura. En contraste, la presencia de espumante y sal condujo a un tamaño de burbuja más controlado, que se atribuye en gran medida a una reducción de la coalescencia.

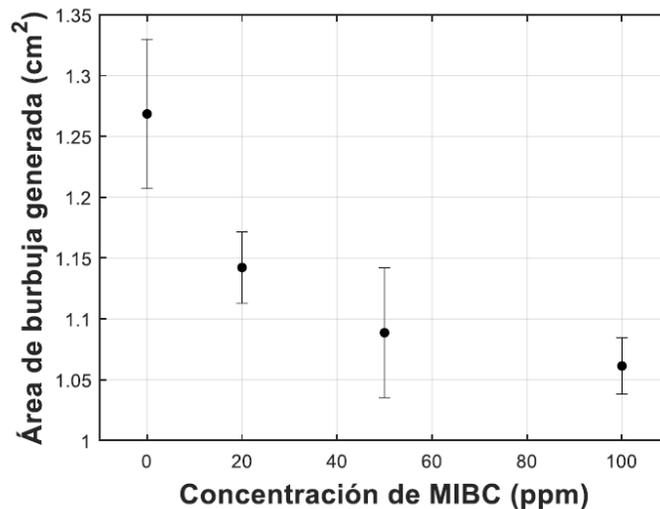
Este descubrimiento indica que el uso de aguas con electrolitos, como el agua de mar, podría ser beneficioso en los procesos de flotación. Controlar el tamaño final de las burbujas y su comportamiento a lo largo del sistema de burbujeo es de gran importancia en el proceso de flotación, y los resultados de este estudio sugieren que se podrían obtener mejoras en la recuperación del mineral deseado al controlar estos factores.

Por último, el estudio de [Solar \(2022\)](#) se centró en la coalescencia de burbujas en sistemas dinámicos, con un enfoque especial en la influencia de la concentración de MIBC. Se implementó con éxito un código computacional que fue capaz de reconocer múltiples burbujas en un sistema dinámico y de

---

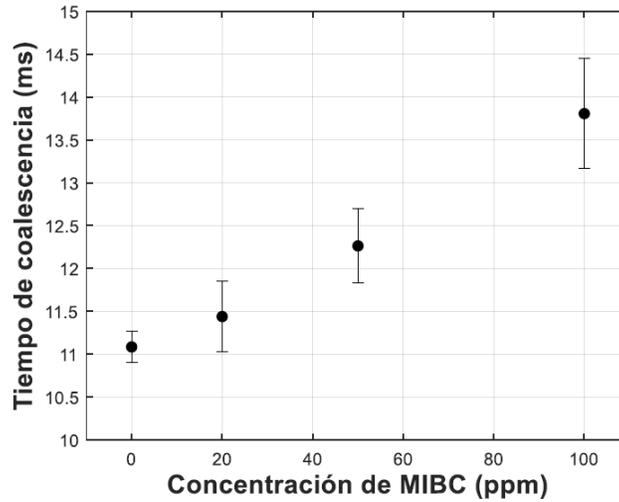
identificar automáticamente eventos de coalescencia, determinando así los tiempos de coalescencia.

Se registraron las áreas de las burbujas generadas por eventos de coalescencia y, tal como se muestra en la **Figura 3.8**, se observó que el área promedio disminuía a medida que aumentaba la concentración de MIBC. Las áreas de las burbujas variaron en un rango de 1 a 1,3 centímetros cuadrados. No obstante, es importante destacar que el cálculo de las áreas de las burbujas se limitó a los contornos internos de las burbujas debido a la complejidad de la variabilidad de los contornos externos.



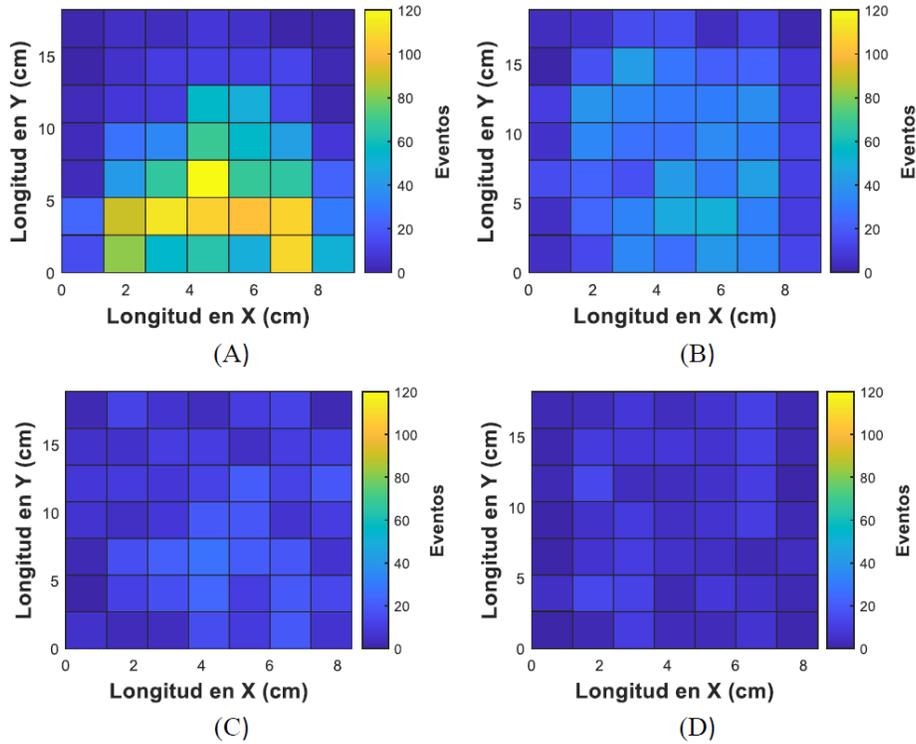
**Figura 3.8:** Áreas de burbujas generadas obtenido por [Solar \(2022\)](#).

Se registró un aumento en los tiempos de coalescencia a medida que se incrementaba la concentración de MIBC, como se muestra en la **Figura 3.9**. Las velocidades de las burbujas, que se calcularon a partir de las trayectorias de estas, variaron entre 10 y 40 cm/s. Adicionalmente, se observó que los tiempos de coalescencia presentaban una tendencia a disminuir a medida que la velocidad de las burbujas aumentaba.



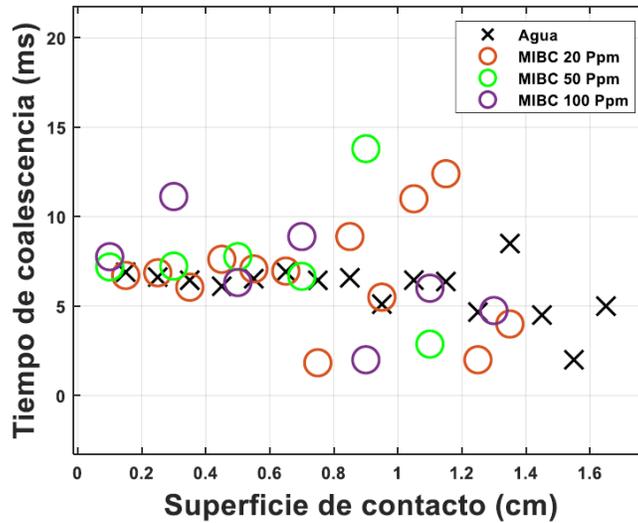
**Figura 3.9:** Tiempos de coalescencia obtenido por [Solar \(2022\)](#).

Se observó que la ubicación de los eventos de coalescencia en el sistema de burbujeo variaba en función de la concentración de MIBC. En el caso del agua pura, la mayoría de los eventos de coalescencia ocurrieron al inicio del ascenso en la columna de burbujeo. Sin embargo, a medida que la concentración de MIBC aumentaba, se observó, tal como se muestra en la [Figura 3.10](#), una mayor dispersión de eventos de coalescencia.



**Figura 3.10:** Coalescencias detectadas para el total de videos, para 0 ppm de MIBC (A), 20 ppm de MIBC (B), 50 ppm de MIBC (C), 100 ppm de MIBC (D). Resultados obtenidos por [Solar \(2022\)](#).

Las distancias superficiales de contacto entre las burbujas que coalescieron se calcularon a través de un algoritmo automático. Aunque este estudio consideró solo el contacto de las burbujas de una manera bidimensional, los datos, tal como se sugiere en la [Figura 3.11](#), indicaron una leve disminución en los tiempos de coalescencia a medida que la superficie de contacto aumentaba.



**Figura 3.11:** Tiempos de coalescencia a medida que aumenta la superficie de contacto obtenido por [Solar \(2022\)](#).

En general, la implementación de herramientas de análisis de imagen y el desarrollo de un código computacional efectivo proporcionaron información valiosa sobre la coalescencia de burbujas en sistemas dinámicos. Los hallazgos de este estudio, incluyendo los patrones de áreas de burbujas, velocidades de burbujas, tiempos de coalescencia y ubicaciones de coalescencia, proporcionan una mayor comprensión de estos fenómenos y están en línea con los valores reportados en la literatura existente.

En el transcurso de esta sección, se ha efectuado un análisis detallado de los estudios existentes en columnas de burbujeo y se ha evaluado el impacto de distintas concentraciones de sales. Sin embargo, es notable que existe un área aun insuficientemente explorada: el estudio de sistemas de múltiples burbujas en presencia de altas concentraciones de sales. Los trabajos de investigación actuales parecen no profundizar adecuadamente en este aspecto, generando una brecha relevante en el conocimiento acumulado. Por ende, es imperativo llevar a cabo estudios enfocados en esta dirección para un entendimiento más cabal sobre la influencia de tales condiciones en la coalescencia y comportamiento general de las burbujas.

---

## 4. Metodología

El presente capítulo describe inicialmente los materiales y equipos utilizados. Luego se detalla el procedimiento experimental empleado en la investigación.

En la sección de Materiales y equipos se describen los diferentes componentes utilizados, como el NaCl, el MIBC y el agua desmineralizada, junto con sus características. En la sección de Procedimiento experimental se detalla el proceso utilizado para preparar las soluciones y llevar a cabo las pruebas experimentales.

### 4.1. Materiales y equipos

#### 4.1.1. Materiales

Se utilizaron diversos materiales. Los componentes principales utilizados incluyeron NaCl (cloruro de sodio), MIBC (metil isobutil carbinol) y agua desmineralizada.

El NaCl es un sólido inorgánico que se utiliza comúnmente como sal de mesa. Se utilizó NaCl de Merck-Sigma, con una densidad de  $2160 \text{ kg/m}^3$  y una masa molar de  $58,4 \text{ g/mol}$ . El MIBC es un líquido incoloro con un olor característico. Es un agente espumante comúnmente utilizado en la industria minera. Se usó MIBC de Merck-Sigma, con densidad de  $808 \text{ kg/m}^3$ , masa molar de  $102,2 \text{ g/mol}$  y pureza de  $98 \%$ . También se utilizó agua desmineralizada como solvente proporcionada por AutoDrive, con densidad de  $1000 \text{ kg/m}^3$ . Un resumen de los materiales utilizados y sus características se presenta en la [Tabla 4.1](#).

**Tabla 4.1:** Características de espumantes y solventes utilizados.

<b>Aditivo</b>	<b>Características</b>	
NaCl (Merck-Sigma)	Estado	Sólido
	Densidad	$2160 \text{ kg/m}^3$
	Masa molar	$58,4 \text{ g/mol}$
MIBC (Merck-Sigma)	Pureza	$98 \%$
	Estado	Líquido
	Densidad	$808 \text{ kg/m}^3$
	Masa molar	$102,2 \text{ g/mol}$
<b>Solvente</b>	<b>Características</b>	
Agua desmineralizada (AutoDrive)	Densidad	$1000 \text{ kg/m}^3$

---

### 4.1.2. Instrumentos

En esta sección, se presentan los instrumentos utilizados. Cada uno desempeña un papel importante en la realización de mediciones precisas, la transferencia de líquidos y sólidos, la mezcla de soluciones y otras operaciones necesarias. En la **Tabla 4.2**, se detallan los instrumentos empleados.

**Tabla 4.2:** Recipientes e instrumentos y sus capacidades.

Recipientes e instrumentos	Capacidad
Vaso precipitado	100 mL / 1000 mL
Matraz aforado	100 mL
Micropipeta	2-20 $\mu$ L
Embudo	50 mm

Para llevar a cabo este estudio, se utilizaron diversos equipos que desempeñaron un papel crucial no solo en la recopilación y análisis de datos, sino también en la manipulación de los materiales y la creación de las condiciones adecuadas. Estos equipos se presentan en la **Tabla 4.3**.

**Tabla 4.3:** Instrumentos auxiliares.

Instrumento	Marca
Cámara fotográfica	SONY RX100
Notebook	Asus Rog Zephyrus G14
Panel luminoso LED	–
Balanza	Sartorius
Agitador magnético	Velp Científica

### 4.1.3. Montaje experimental

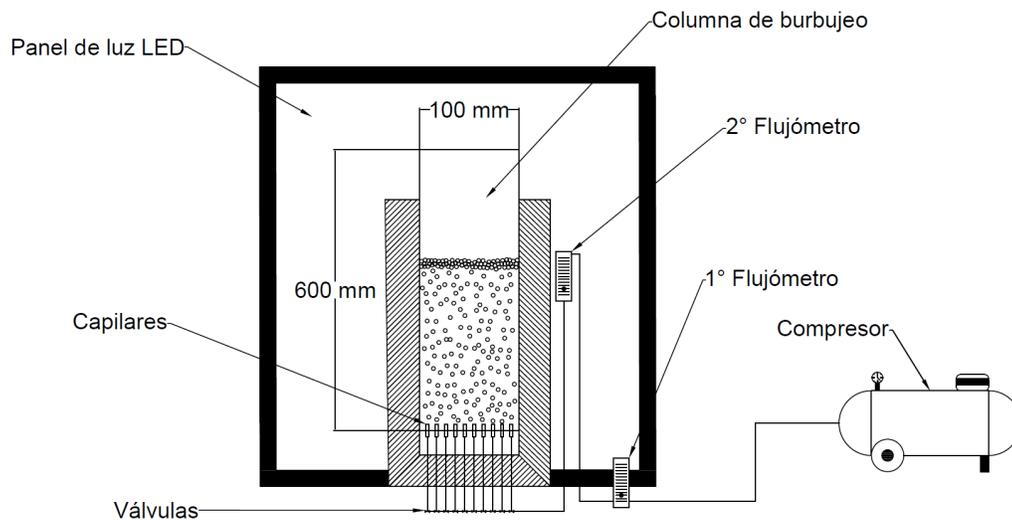
Se utilizó el modelo de columna de burbujeo descrito por **Peña (2021)**, el cual consiste en una columna de vidrio de 600 mm de alto, 100 mm de largo y 4 mm de ancho, con 10 capilares en su base, lo que permite la entrada de aire al sistema formando así las burbujas. Para lograr un flujo homogéneo de aire en todos los capilares, se controló el flujo en cada uno de ellos mediante 10 válvulas conectadas al sistema. El aire provino de un compresor marca Bauker modelo AB100 248 que, mediante dos flujómetros para mayor precisión, se reguló el caudal a 0.4 L/min.

Se implementaron diversas mejoras en la celda para optimizar su funcionamiento. Se instaló un flujómetro adicional de alta precisión para obtener mediciones más exactas del flujo. Además, se reemplazaron las válvulas antiguas que presentaban fugas, lo que provocaba una disminución en el flujo efectivo.

---

Con el objetivo de garantizar un flujo constante y estable, se llevó a cabo una calibración exhaustiva de los componentes y se realizaron ajustes en la configuración de la celda. Estos cambios mejoraron significativamente la calidad y reproducibilidad de los resultados.

Para facilitar la comprensión de estas mejoras, se incluye un esquema detallado de la celda en la **Figura 4.1**. Este diagrama ilustra la ubicación de los componentes y la dirección del flujo a través de la celda.



**Figura 4.1:** Esquema columna de burbujeo. Fuente: Elaboración propia.

Se agregaron cuatro tipos de soluciones a la columna de burbujeo: Agua desmineralizada; NaCl en concentraciones de 0.3, 0.6, 1, 2, 4, 5 y 6 molar; MIBC en concentraciones de 10, 20, 50 y 100 ppm; y una mezcla de ambos, utilizando las concentraciones de 2, 4 y 6 molar de NaCl para cada concentración de MIBC. Estas soluciones se prepararon en matraces aforados de 100 mL y se agregaron a la columna mediante un embudo.

Los videos fueron grabados utilizando una cámara Sony modelo RX100, la cual se montó en un trípode para asegurar una mayor estabilidad. La cámara se posicionó frente a la columna y se colocó un panel luminoso LED detrás de ella. Gracias a esta configuración, se obtuvieron imágenes de burbujas bien definidas con buen contraste y sin sombras.

Para el análisis de los videos, se recurrió al algoritmo desarrollado por [Solar \(2022\)](#), el cual fue implementado en Matlab en un computador Asus Rog Zephyrus G14. Este código, capaz de reconocer múltiples burbujas en un sistema dinámico de burbujeo, facilitó el análisis de la dinámica de burbujas

---

en las diferentes soluciones utilizadas.

## 4.2. Procedimiento experimental

### 4.2.1. Preparación de soluciones

En el marco de este estudio, se llevó a cabo una meticulosa preparación de las muestras para asegurar la precisión y fiabilidad de los resultados. Se siguieron procedimientos estandarizados para la preparación de las soluciones, los cuales incluyeron la disolución precisa del NaCl en agua desmineralizada y la cuidadosa medición de las cantidades necesarias de MIBC.

Parte importante del protocolo consistió en la agitación de las soluciones para lograr una homogeneización efectiva de los componentes. Para las soluciones con concentraciones más bajas, se empleó agitación manual. Sin embargo, debido a la alta densidad y viscosidad de las soluciones con concentraciones de 5 y 6 molar, se requirió el uso de un agitador magnético para garantizar una homogeneización adecuada.

Asimismo, se tomaron medidas para minimizar cualquier posible contaminación durante el proceso de preparación de las muestras. En el [Anexo A.1](#) se presenta de manera detallada el protocolo utilizado para la preparación de las muestras, incluyendo el tiempo de agitación. Es importante destacar que cualquier variación en el proceso podría afectar los resultados y comprometer la validez de las conclusiones obtenidas en el estudio.

Se realizaron un total de 23 experimentos, o sea 69 pruebas, cada uno de los cuales consistió en una serie de 5 videos, dando un total de 115 videos. Cada experimento se ejecutó en triplicado. No obstante, en el caso de la solución de 6 M con MIBC, se presentaron dificultades durante la realización de los experimentos debido a la precipitación de la sal, lo que ocasionó el taponamiento de los capilares e impidió que las burbujas de aire salieran correctamente. Por esta razón, solo fue posible llevar a cabo un experimento para cada concentración. Esto significa que, para esta solución de 6 M, solo se contó con 5 videos para análisis, a diferencia de los otros experimentos donde se dispuso de 15 videos (5 videos por cada experimento en triplicado). Los experimentos se efectuaron utilizando soluciones de NaCl y MIBC, así como combinaciones de ambas soluciones en diferentes concentraciones. La [Tabla 4.4](#) proporciona información detallada sobre cada experimento, incluyendo la concentración de NaCl y MIBC utilizada, así como la cantidad precisa de masa o volumen requerido para preparar la

---

solución en 100 mL de agua.

**Tabla 4.4:** Total de pruebas realizadas.

Solución NaCl		
Prueba	Concentración [M]	Masa para 100 mL agua [g]
1	0.3	1.75
2	0.6	3.51
3	1	5.84
4	2	11.69
5	4	23.38
6	5	29.22
7	6	35.07
Solución MIBC		
Prueba	Concentración [ppm]	Volumen para 100 mL agua [ $\mu$ L]
8	10	1.25
9	20	2.49
10	50	6.23
11	100	12.45
Solución NaCl + MIBC		
Prueba	Concentración	En 100 mL agua
12	2 M + 10 ppm	11.69 g + 1.25 $\mu$ L
13	2 M + 20 ppm	11.69 g + 2.49 $\mu$ L
14	2 M + 50 ppm	11.69 g + 6.23 $\mu$ L
15	2 M + 100 ppm	11.69 g + 12.45 $\mu$ L
16	4 M + 10 ppm	23.38 g + 1.25 $\mu$ L
17	4 M + 20 ppm	23.38 g + 2.49 $\mu$ L
18	4 M + 50 ppm	23.38 g + 6.23 $\mu$ L
19	4 M + 100 ppm	23.38 g + 12.45 $\mu$ L
20	6 M + 10 ppm	35.07 g + 1.25 $\mu$ L
21	6 M + 20 ppm	35.07 g + 2.49 $\mu$ L
22	6 M + 50 ppm	35.07 g + 6.23 $\mu$ L
23	6 M + 100 ppm	35.07 g + 12.45 $\mu$ L

Es importante destacar que se utilizaron instrumentos de medición precisos y se tomaron precauciones para evitar contaminaciones en la preparación de las soluciones. Además, se utilizó agua desmineralizada para minimizar la presencia de iones extraños que pudieran afectar las mediciones.

#### 4.2.2. Condiciones de operación

Las mediciones se realizaron en un ambiente cuya temperatura se mantuvo controlada dentro de un rango de  $20 \pm 2^\circ\text{C}$ . Este control estricto de la temperatura resultó crucial, dada la alta concentración de sal empleada en las soluciones. Al operar cerca del punto de saturación, cualquier variación en las

---

condiciones, especialmente la temperatura, afectó directamente la solubilidad de la sal, provocando su precipitación. Este fenómeno se observó más notoriamente con la solución de 6 M.

El control preciso y el mantenimiento de una temperatura lo más baja posible fueron estrategias esenciales para prevenir esta precipitación. Esta estrategia se demostró efectiva para las concentraciones de sal restantes que se utilizaron en el estudio, incluyendo 0.3, 0.6, 1, 2, 4, y 5 molar, donde se logró evitar la precipitación de sal y se mantuvo la consistencia del proceso de burbujeo. Los cambios de temperatura incidieron en la viscosidad y densidad de las soluciones, alterando el comportamiento de las burbujas. Esta variabilidad en las condiciones tuvo un impacto particularmente notable en las pruebas con la solución de 6 M más MIBC, en las que los cambios de temperatura influyeron en la solubilidad de los componentes y afectaron el proceso de burbujeo de manera significativa. Debido a estas complejidades, solo fue posible realizar una única prueba (5 videos) para cada concentración de MIBC en la solución de 6 M.

Además, se controló el flujo durante las mediciones para asegurar la uniformidad en la dinámica de las burbujas. El flujo se mantuvo constante y se ajustó a 0.4 L/min, un valor determinado mediante pruebas preliminares y estudios previos realizados por [Lagos \(2023\)](#).

#### **4.2.3. Procedimiento de lavado**

Se llevó a cabo un proceso de lavado antes y después de cada uso de los matraces aforados. Se realizaron tres lavados con agua desmineralizada en cada matraz, con un volumen aproximado de 20 mL de agua en cada uno. Durante cada lavado, se agitó cuidadosamente el matraz para asegurar una limpieza completa, eliminando cualquier residuo de soluciones anteriores. A continuación, se descartó el agua en un lavamanos y se repitió el proceso de lavado dos veces más para asegurar una limpieza exhaustiva. De este modo, se garantizó la ausencia de contaminación en los matraces aforados.

Además, para asegurar la pureza y la eficacia del proceso, se realizó un procedimiento de lavado antes y después de cada uso de la columna de burbujeo. Se realizaron tres lavados con agua desmineralizada en cada ocasión, utilizando 100 mL de agua para cada lavado. Durante cada lavado, se agitó cuidadosamente la columna para asegurar que todas las superficies internas fueran lavadas de manera uniforme y completa. Luego, el agua de lavado se dejó caer en un vaso precipitado y se descartó adecuadamente en un lavamanos. De esta forma, se garantizó la eliminación de cualquier residuo de solución previa y

---

se mantuvo la limpieza de la columna de burbujeo durante todo el proceso.

Adicionalmente, en los casos específicos de las soluciones de 6 M, cuando los capilares se taponaban con sal, se implementó un procedimiento extra para limpiarlos. Este procedimiento implicaba retirar el capilar de la base de la celda y lavarlo con un poco de agua desmineralizada para disolver la sal. También se dieron pequeños golpes al capilar contra una superficie sólida para que la sal cayera. Gracias a este proceso, se garantizó la eliminación de obstrucciones por la sal y se mantuvo la funcionalidad del capilar durante todo el experimento.

De esta forma, se garantizó la eliminación de cualquier residuo de solución previa y se mantuvo la limpieza de la columna de burbujeo durante todo el proceso. También se minimizó el riesgo de taponamiento de los capilares.

#### **4.2.4. Análisis de imágenes**

Para llevar a cabo el análisis de imágenes, se grabaron ocho videos para cada concentración de NaCl, MIBC y NaCl+MIBC utilizando una cámara con los siguientes parámetros:

- Apertura del diafragma: F5.6
- Tiempo de exposición: 1/500
- Sensibilidad del sensor (ISO): 640
- Tasa de fotogramas: 480 fps

Posteriormente, se seleccionaron los cinco mejores videos para su análisis. Cada grabación duró 3 segundos, y se grabaron en cámara lenta, obteniendo videos de 1 minuto 14 segundos. Este proceso se repitió tres veces, obteniendo un total de 15 videos para cada prueba, teniendo un total de 320 pruebas. Se analizaron 1000 fotogramas por cada video, lo que resultó en un total de 320.000 fotogramas analizados en total.

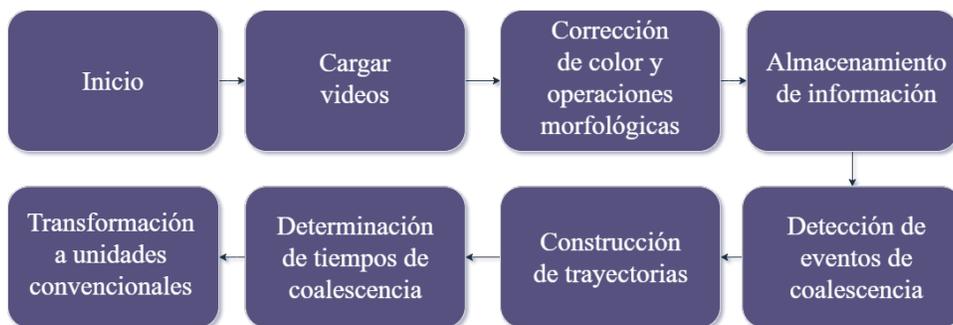
Para el análisis de imágenes, se implementó el algoritmo desarrollado en MATLAB por [Solar \(2022\)](#). Este potente programa facilita la manipulación y análisis de una gran cantidad de videos de manera organizada y sistemática. Su configuración permite establecer parámetros como “Trigger”, que habilita el recorte de videos en base a marcas específicas, como se indica en la [Figura 4.2](#). Además, el algoritmo soporta la creación de carpetas individualizadas para cada prueba, garantizando un análisis

detallado y personalizado.



**Figura 4.2:** Recorte de cada video.

El algoritmo proporcionó la cantidad de burbujas presentes en la celda, las coalescencias de burbujas, las áreas de burbujas y los tiempos de coalescencia. Para entender mejor cómo se procesaron y analizaron los vídeos, se presenta a continuación un diagrama de flujo en la **Figura 4.3**.



**Figura 4.3:** Diagrama de flujo del proceso de análisis de vídeo.

Este diagrama de flujo muestra los pasos principales del proceso de análisis y procesamiento de los vídeos. Los pasos son:

1. **Corrección de color y operaciones morfológicas:** Esta etapa se enfocó en la preparación de la imagen para el análisis. Inicialmente se recortó una región seleccionada de cada video. Luego se ajustaron los niveles de contraste y brillo de cada fotograma recortado, convirtiéndolos a una escala de grises. Posteriormente, se aplicó un filtro binario basado en un umbral preestableci-

---

do para diferenciar claramente las burbujas del fondo. Esto resultó en imágenes binarias que facilitaron la identificación y el análisis de las burbujas.

2. **Almacenamiento de información:** Una vez que se procesaron las imágenes de cada fotograma, los datos relacionados con las propiedades geométricas de las burbujas (centroide y área) se almacenaron en un sistema de matrices. Cada burbuja se registró como un conjunto de puntos en un plano bidimensional, y se almacenaron todos los conjuntos de puntos conectados y no conectados. Estos datos se generaron a partir de las imágenes binarias obtenidas en el paso anterior. La información resultante incluyó detalles sobre los contornos internos y externos de las burbujas, almacenándose los conjuntos de puntos que componían dichos contornos. Esto proporcionó un índice único que identificaba la burbuja y sus atributos para cada fotograma de cada video.
3. **Detección de eventos de coalescencia:** Este paso implicó la aplicación de algoritmos diseñados específicamente para detectar eventos de coalescencia. Estos algoritmos utilizaron la información almacenada sobre la posición de cada burbuja (centroide) y sus respectivos contornos internos. Se definieron dos variables para almacenar las posibles burbujas consumidas y la posible burbuja generada en cada fotograma. Se utilizó el contorno transformado en rectángulos equivalentes para encontrar posibles solapamientos de manera eficiente. El algoritmo buscó solapamientos entre dos o más burbujas en un fotograma y una burbuja en el fotograma siguiente. Si se detectaba un solapamiento como un posible evento de coalescencia, el algoritmo comprobaba si las burbujas tenían puntos de contacto reales. Si ese era el caso, se llevaban a cabo comprobaciones adicionales para asegurarse de que las burbujas en el primer fotograma no tenían otro contacto con otra burbuja en el siguiente fotograma que no fuera la burbuja generada. La información de las burbujas consumidas y generadas se almacenó en dos matrices, utilizando un índice único para cada burbuja y fotograma.
4. **Construcción de trayectorias:** En este paso, se calcularon las trayectorias de las burbujas basándose en la información proporcionada por el algoritmo de detección de eventos de coalescencia. Se utilizó un algoritmo de búsqueda del punto más cercano, calculando las distancias entre los puntos más cercanos al centroide de la burbuja en los fotogramas actuales y anteriores. Este proceso continuó hasta que no se encontraran más vecinos dentro de un rango máximo predeterminado, o hasta llegar al primer fotograma. Este límite se estableció para evitar la con-

---

fusión de trayectorias con otras burbujas en caso de que la burbuja desapareciera del foco de la cámara, su contorno no estuviera bien definido debido a la iluminación, entre otros factores. Para la construcción de las trayectorias particulares de las burbujas, se tomaron como bases las componentes  $x$  e  $y$  de los centroides de cada burbuja consumida. La búsqueda de sus trayectorias se realizó hacia atrás en el tiempo, desde el fotograma actual hasta el primer fotograma o hasta que el algoritmo no encontrara más coincidencias de vecinos más cercanos dentro del límite de distancia.

5. **Determinación de tiempos de coalescencia:** Tras identificar los eventos de coalescencia y las trayectorias de todas las burbujas consumidas en estos eventos, se procedió a calcular el tiempo de coalescencia para cada caso. Este proceso se llevó a cabo analizando las burbujas implicadas en cada evento dentro de cada fotograma de coalescencia, utilizando la estructura de datos que compone las trayectorias de las burbujas consumidas. Se generó una estructura de datos análoga a las trayectorias de las burbujas, pero en este caso se almacenó el índice del contorno externo correspondiente a cada centroide de cada burbuja en los fotogramas relevantes. Una vez obtenidos los índices de los contornos externos, se calculó el tiempo de coalescencia mediante un algoritmo que detecta los cambios entre los índices de los contornos externos para cada índice de burbuja único. Se consideraron los momentos en que los índices de los contornos externos cambiaron, lo que indica que dos burbujas habían dejado de formar parte del mismo contorno externo y, por lo tanto, habían perdido contacto. Esto permitió obtener los tiempos de coalescencia para cada trayectoria.
6. **Transformación a unidades convencionales:** Una vez obtenido el tiempo de coalescencia, se realizó una transformación para expresarlo en tiempo real. De manera similar, se estableció una relación de correspondencia real para las áreas y posiciones en el sistema, teniendo en cuenta el ancho interno de la columna de burbujeo, que es conocido (10 cm) y equivale a aproximadamente 660 píxeles. Estas transformaciones permitieron interpretar los resultados obtenidos en términos convencionales y comparables con otros sistemas y estudios.

#### 4.2.5. Procesamiento de datos y análisis de resultados

Una vez obtenidos los datos a través del programa de detección de burbujas, se realizó un extenso análisis para entender mejor los procesos de coalescencia de burbujas en los diferentes sistemas

---

estudiados. El procesamiento y análisis de los datos se llevó a cabo de la siguiente manera:

- **Conteo de burbujas:** El programa proporcionó directamente el número de burbujas por fotograma, permitiendo un cómputo directo de la cantidad de burbujas presentes en cada momento del estudio.
- **Determinación del diámetro y área de la burbuja:** A partir de la cantidad de píxeles del contorno interno de la burbuja proporcionada por el programa (tomada como el perímetro de la burbuja), se realizó la conversión de píxeles a centímetros. Asumiendo que la burbuja es un círculo, se utilizaron las ecuaciones de perímetro y área de un círculo para calcular el diámetro y el área de la burbuja. Finalmente, se llevó a cabo la conversión de centímetros a milímetros.
- **Eventos y tiempos de coalescencia:** Los datos referentes a los eventos y tiempos de coalescencia se obtuvieron directamente del programa.

#### 4.2.6. Ajuste del umbral de binarización

Para la detección de eventos y la determinación de tiempos de coalescencia, se realizó un análisis de sensibilidad del umbral de binarización. Este análisis se efectuó en un rango de 0.4 a 0.5, con un espaciado de 0.01, utilizando la función `imbinarize` de MATLAB.

El propósito de este análisis de sensibilidad fue evaluar cómo las variaciones del valor del umbral de binarización podrían influir los resultados del estudio. Esta fase resultó esencial para asegurar que los hallazgos no fuesen meramente consecuencia del valor específico del umbral de binarización seleccionado y para determinar un valor óptimo que proporcionara resultados precisos y consistentes en todos los videos analizados.

A través de este análisis, se determinó que el umbral de 0.47 resultó ser el más adecuado. Este valor se seleccionó debido a que maximizaba la detección de los eventos de coalescencia sin introducir artefactos visuales en los fotogramas. Se observó que, más allá de este umbral, la cantidad de eventos detectados empezó a disminuir, señalando la posibilidad de perder información crítica. Este umbral también permitió la detección efectiva de eventos en todas las soluciones estudiadas, incluyendo la solución de 10 ppm, donde se observó que a un umbral de 0.5 el programa no era capaz de detectar ningún evento.

---

Por lo tanto, se concluyó que el umbral de 0.47 proporcionaba un equilibrio óptimo entre la maximización de la detección de eventos de coalescencia y la minimización de posibles artefactos visuales, asegurando la precisión y consistencia en los resultados obtenidos de los diferentes videos y soluciones analizadas.

---

## 5. Resultados y discusión

En la presentación y discusión de los resultados se usa una convención para describir las soluciones. Por ejemplo, las soluciones 2 M, 10 ppm, y 2 M + 10 ppm se refieren respectivamente a 2 M de NaCl, 10 ppm de MIBC, y 2 M de NaCl + 10 ppm de MIBC.

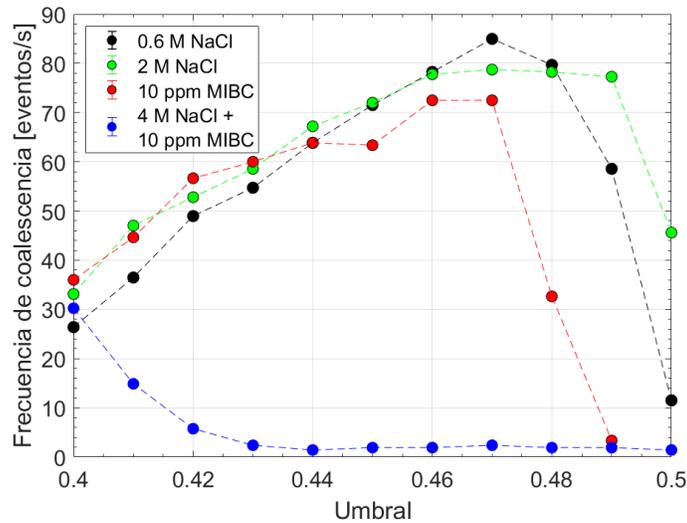
### 5.1. Influencia del umbral de binarización en la determinación de eventos y tiempos de coalescencia

Con el objetivo de asegurar la veracidad y precisión de los resultados obtenidos, se realiza un estudio exhaustivo del papel que el umbral de binarización desempeña en la detección de eventos y tiempos de coalescencia. La meta es garantizar que los hallazgos reflejen con fidelidad la realidad del fenómeno estudiado, y que las variaciones observadas no sean meramente el resultado de diferencias en el umbral de binarización. En la [Figura 5.1](#), se presenta un análisis comparativo de los eventos de coalescencia en cuatro soluciones diferentes: 0.6 M, 2 M, 10 ppm y 4 M + 10 ppm. Este análisis proporciona una visión clara de cómo las variaciones en el umbral pueden influir en los resultados obtenidos, lo que permite ajustar el enfoque y mejorar la precisión de las observaciones.

Para las soluciones de 0.6 M, 2 M y 10 ppm, se registra un incremento en la cantidad de eventos de coalescencia a medida que el umbral de binarización aumenta, llegando a un pico en el valor de umbral de 0.47. Más allá de este punto, el número de eventos detectados disminuye, sugiriendo que un umbral más alto puede limitar la detección de eventos de coalescencia.

En contraste, los resultados para la solución 4 M + 10 ppm exhiben una tendencia diferente. En este caso, se observa una disminución en la cantidad de eventos a medida que el umbral aumenta, con un número prácticamente constante de eventos, fluctuando entre 1 y 2, a partir de un umbral de 0.44.

Estos resultados sugieren que las características específicas de la solución, incluyendo su concentración de NaCl y la presencia de MIBC, pueden tener un impacto considerable en la cantidad de eventos de coalescencia detectados en función del umbral de binarización. En el caso de la solución 4 M + 10 ppm con MIBC, la alta concentración de NaCl y la presencia de MIBC parecen trabajar en conjunto para prevenir la coalescencia, resultando en un menor número de eventos detectados incluso a umbrales de binarización bajos.



**Figura 5.1:** Variación de los eventos de coalescencia a medida que se aumenta el umbral de binarización.

La calidad de los fotogramas y su impacto en la selección del umbral de binarización se convierte en un aspecto aún más relevante cuando se considera la naturaleza de la información que se está capturando. La presencia de manchas blancas en las burbujas o en los bordes en los fotogramas puede llevar a una interpretación incorrecta de los eventos de coalescencia, dando lugar a posibles errores en la recolección de datos.

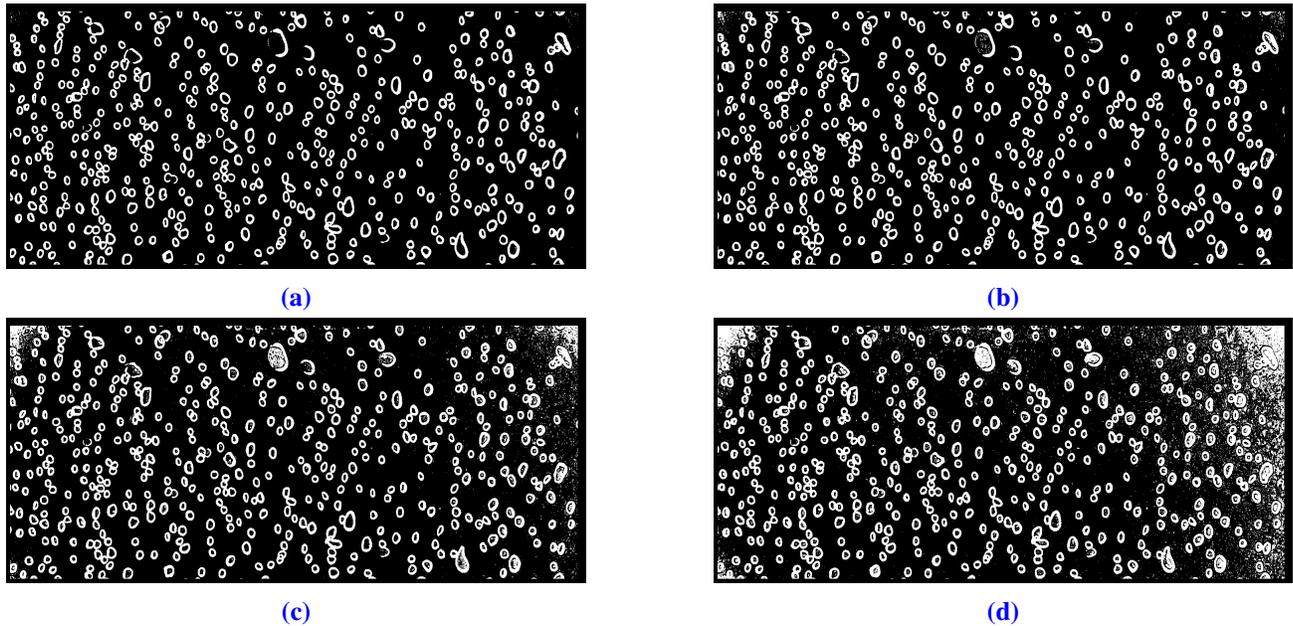
El análisis de los fotogramas muestra que a umbrales superiores a 0.47, los fotogramas presentan manchas, como se puede observar en la **Figura 5.2 (c) y (d)**. Estas manchas se manifiestan como puntos blancos, especialmente notables en los bordes derechos e izquierdos de las imágenes. En algunas burbujas, estas manchas son tan pronunciadas que llegan a ocupar gran parte de la imagen. Esta distorsión visual puede llevar a una detección errónea de la coalescencia, provocando un registro de eventos que no han ocurrido o bien, no registrando eventos que sí han sucedido.

Por otro lado, en la **Figura 5.2 (a) y (b)**, la presencia de puntos blancos es prácticamente inexistente o tan mínima que no llega a afectar los resultados. Esto contrasta notablemente con las observaciones hechas en la **Figura 5.2 (c) y (d)**, subrayando cómo el umbral superior de 0.47 afecta la calidad de los fotogramas.

Es por esto que el proceso de binarización y la elección del umbral correcto son cruciales. Un umbral adecuadamente seleccionado puede ayudar a minimizar la presencia de manchas y, por lo tanto, mejorar la precisión de la detección de eventos de coalescencia. Esto reitera la importancia de tener en

---

cuenta la calidad de las imágenes y el umbral de binarización al realizar este tipo de análisis.



**Figura 5.2:** Fotogramas de 10 ppm con umbrales de 0.46 (a), 0.47 (b), 0.48 (c) y 0.49 (d).

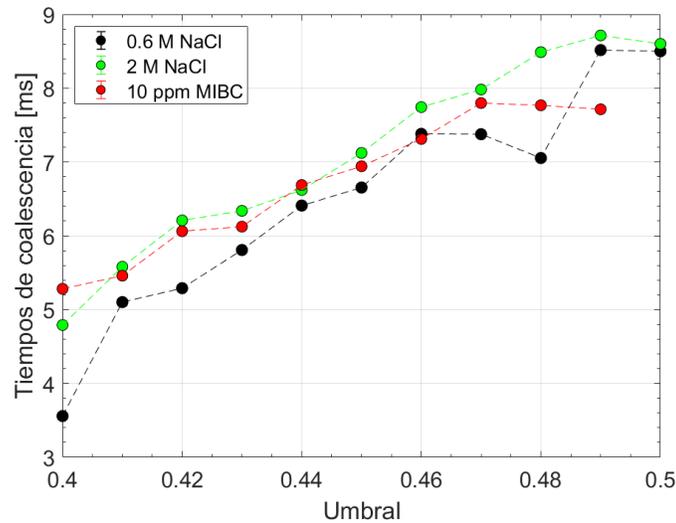
Con respecto a los tiempos de coalescencia, para las soluciones de 0.6 M, 2 M y 10 ppm, **Figura 5.3**, los tiempos se incrementan a medida que el umbral de binarización aumenta. Este fenómeno puede explicarse debido a que el umbral de binarización afecta el tamaño aparente de los bordes de las burbujas. Un umbral más elevado ensancha los bordes de las burbujas, lo que puede llevar a que las burbujas parezcan juntarse antes, dando como resultado tiempos de coalescencia mayores.

En el caso específico de la solución de 10 ppm, se encuentra que a un umbral de 0.5, el programa no es capaz de detectar ningún evento, lo que implica que no se obtienen resultados para los tiempos de coalescencia. Esto resalta la importancia de mantener la claridad de las imágenes para obtener datos precisos.

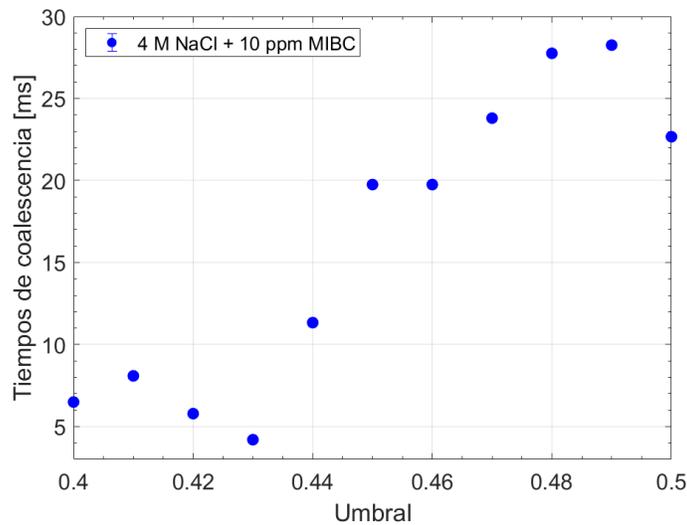
Para la solución 4 M + 10 ppm, **Figura 5.4**, los tiempos de coalescencia se muestran en un gráfico separado debido a que estos son significativamente mayores que los de las demás soluciones. Sin embargo, el fenómeno observado es el mismo: a medida que aumenta el umbral de binarización, también lo hacen los tiempos de coalescencia.

Dadas estas observaciones, se selecciona un umbral de 0.47 para el análisis de todos los videos. Este valor es seleccionado ya que proporciona un equilibrio entre la maximización de la detección de

eventos de coalescencia y la minimización de posibles artefactos visuales (como manchas en los fotogramas), resultando en los resultados más precisos y confiables.



**Figura 5.3:** Variación de los tiempos de coalescencia a medida que aumenta el umbral de binarización.



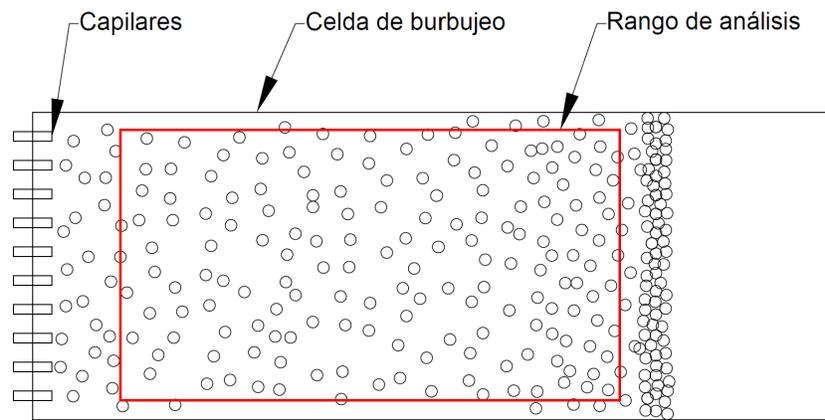
**Figura 5.4:** Variación de los tiempos de coalescencia a medida que aumenta el umbral de binarización.

## 5.2. Cantidad de burbujas

En la **Figura 5.6**, se muestra el promedio de la cantidad de burbujas observadas dentro de la celda en pruebas realizadas con diferentes concentraciones de NaCl. Con el aumento de la concentración de NaCl, se observa un correspondiente incremento en el número de burbujas. Este fenómeno se

---

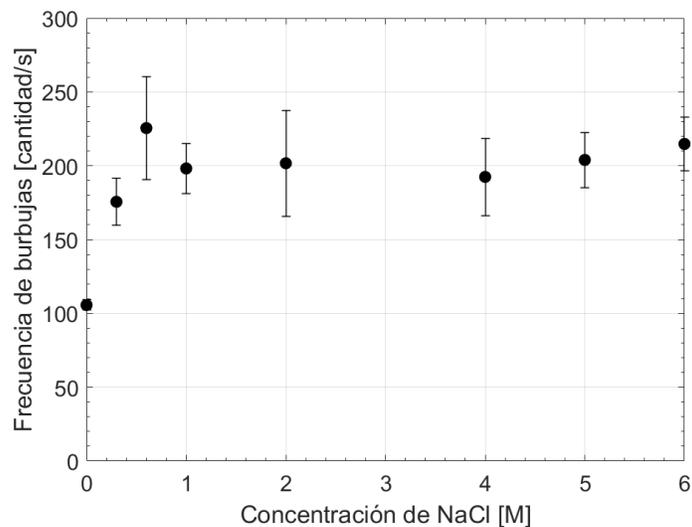
debe a los efectos del NaCl en la coalescencia de burbujas. En altas concentraciones, el NaCl inhibe este proceso, en el que dos burbujas se unen para formar una más grande. En su lugar, las burbujas generadas a partir de los capilares permanecen como entidades separadas dentro de la celda. Estas burbujas individuales, que permanecen dentro del rango de análisis definido por los límites que el código utiliza para detectar la cantidad de burbujas, visibles en la **Figura 5.5**, son las que contribuyen al aumento del recuento total de burbujas observadas. Sin embargo, a partir de una concentración de 2 M de NaCl, se nota que el número de burbujas se mantiene constante.



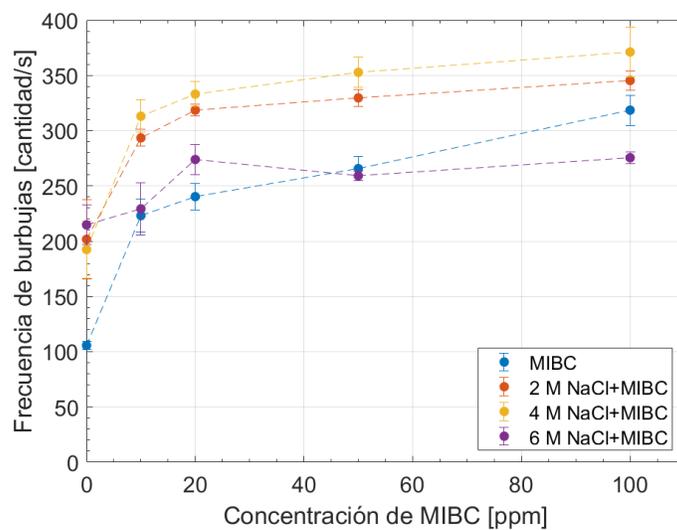
**Figura 5.5:** Esquema de la celda de burbujeo, destacando el rango de análisis utilizado por el código. Fuente: Elaboración propia.

En la **Figura 5.7**, se ilustra el promedio de burbujas presentes en la celda para cada ensayo realizado con diferentes concentraciones de MIBC. Se observa que a medida que se incrementa la concentración de MIBC, también aumenta el número de burbujas en la celda, sugiriendo que el MIBC inhibe su coalescencia.

En los ensayos en los que se combina MIBC con NaCl, el patrón es un poco más complejo. Se nota un incremento en la cantidad de burbujas hasta una concentración de 4 M de NaCl. Sin embargo, a una concentración de 6 M de NaCl, se observa una disminución en el número de burbujas para todas las dosis de MIBC.



**Figura 5.6:** Promedio de la cantidad de burbujas a diferentes concentraciones de NaCl.



**Figura 5.7:** Promedio de la cantidad de burbujas a diferentes concentraciones de MIBC en soluciones sin y con NaCl.

La razón de esta disminución no está clara y puede ser objeto de futuras investigaciones. Sin embargo, una posible explicación podría ser que, en concentraciones más altas de MIBC y NaCl, se produce algún tipo de interacción química que afecta la estabilidad de las burbujas, lo que conduce a una mayor coalescencia y, en consecuencia, a una disminución en el número de burbujas observadas.

No obstante, antes de proceder con cualquier conjetura, es esencial mencionar que solo se dispuso de un tercio de los vídeos para las soluciones de 6 M de NaCl y MIBC, debido a complicaciones

---

técnicas durante la grabación. Por lo tanto, estos resultados para 6 M y MIBC en la **Figura 5.7** deben interpretarse con cautela.

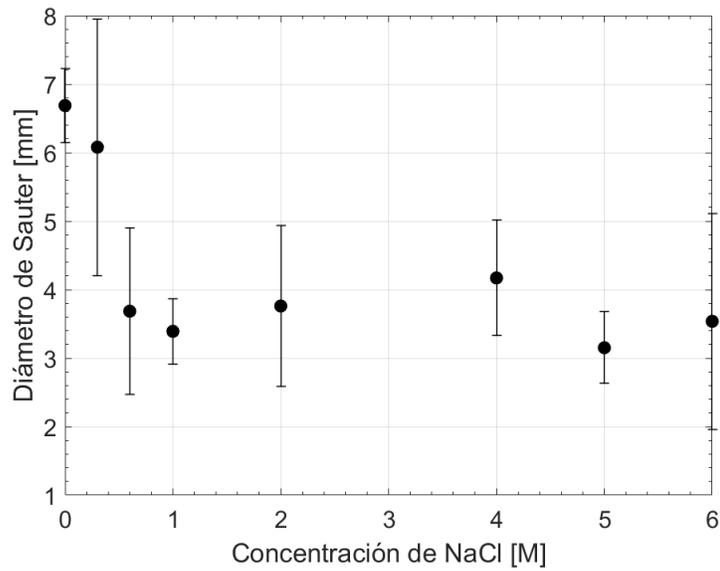
### **5.3. Diámetro de burbuja**

Otra dimensión del análisis abordada en este estudio se centró en el impacto de la concentración de NaCl en el diámetro de Sauter de las burbujas. Mediante la utilización de representaciones gráficas, se identificó una correlación entre el aumento en la concentración de NaCl y el diámetro de Sauter, medido en milímetros (mm).

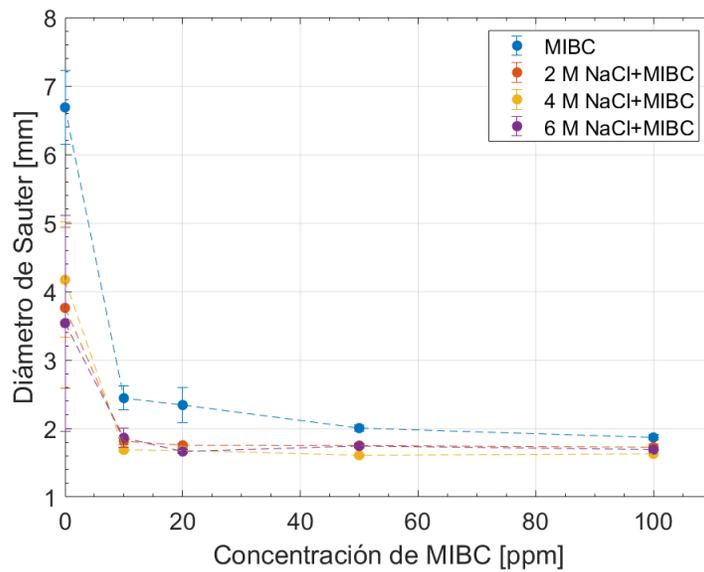
Los resultados en la **Figura 5.8**, muestran que a medida que se incrementa la concentración de NaCl, el diámetro de Sauter disminuye. Esta tendencia continúa hasta alcanzar un límite aparente alrededor de 1 M de NaCl. A partir de este punto, no se observan cambios significativos en el diámetro de Sauter, lo que indica que la concentración de NaCl tiene un efecto notable en el diámetro de las burbujas hasta cierto punto.

También se examina el efecto de la concentración de espumante MIBC en soluciones acuosas (sin sal) sobre el diámetro de Sauter. Se observa una tendencia similar a la encontrada en soluciones de NaCl: a medida que aumenta la concentración de MIBC, el diámetro de Sauter disminuye, alcanzando un límite alrededor de 50 ppm, tal como se observa en la **Figura 5.9**.

Finalmente, también se examina el efecto de la concentración de espumante MIBC en soluciones de NaCl sobre el diámetro de Sauter. La **Figura 5.9** muestra que los diámetros de las burbujas son aún menores en comparación con el uso de MIBC solo. Se puede deducir que el MIBC coopera para estabilizar burbujas de tamaño pequeño. Entre las concentraciones de 2 M, 4 M y 6 M de NaCl, no se observaron diferencias significativas en los diámetros de las burbujas, y se alcanzó un límite estable a los 10 ppm.



**Figura 5.8:** Promedio del diámetro de Sauter a diferentes concentraciones de NaCl.



**Figura 5.9:** Promedio del diámetro de Sauter a diferentes concentraciones de MIBC en soluciones sin y con NaCl.

En resumen, tanto el aumento en la concentración de MIBC como la adición de NaCl influyen en la disminución del diámetro de Sauter en las burbujas. En solución de NaCl el diámetro se estabiliza en 3 a 4 mm a partir de una concentración 1 M. En MIBC el diámetro se estabiliza en 2 mm a partir de una dosis de 50 ppm. Pero en soluciones con NaCl y MIBC el diámetro es menor y se estabiliza en menos de 2 mm a cualquier concentración de sal a partir de una dosis de MIBC de solo 10 ppm.

---

## 5.4. Área de burbuja

En paralelo al estudio del diámetro de Sauter, también se investigó el efecto de la concentración de NaCl sobre las áreas superficiales de las burbujas. Como se espera el comportamiento de las áreas de burbuja replica el de los diámetros de Sauter.

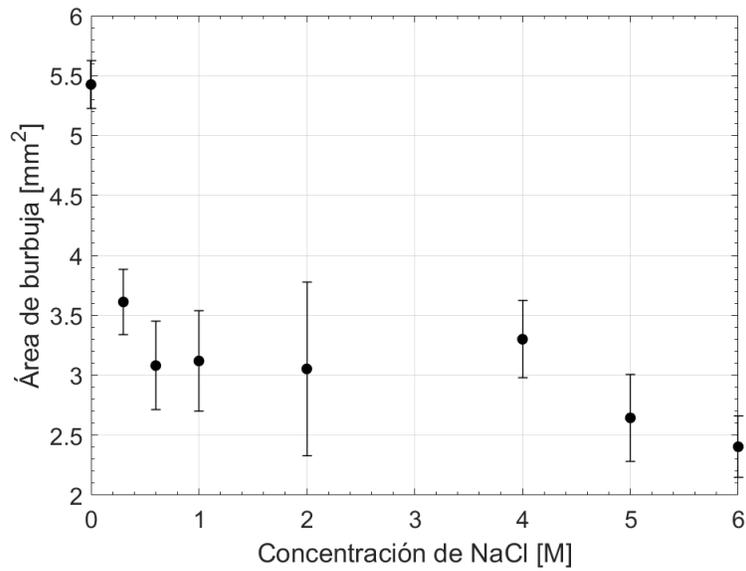
Los resultados indican que al incrementar la concentración de NaCl, se observa una disminución progresiva en las áreas de las burbujas, hasta llegar a una concentración de 1 M. A partir de este punto, no se aprecian cambios significativos en las áreas de las burbujas con concentraciones más altas, tal como se puede apreciar en la **Figura 5.10**.

Continuando con el análisis, se estudia la influencia de la concentración de MIBC en el tamaño de las burbujas, **Figura 5.11**. Se observa que al incrementar la concentración de MIBC, el tamaño de las burbujas tiende a disminuir.

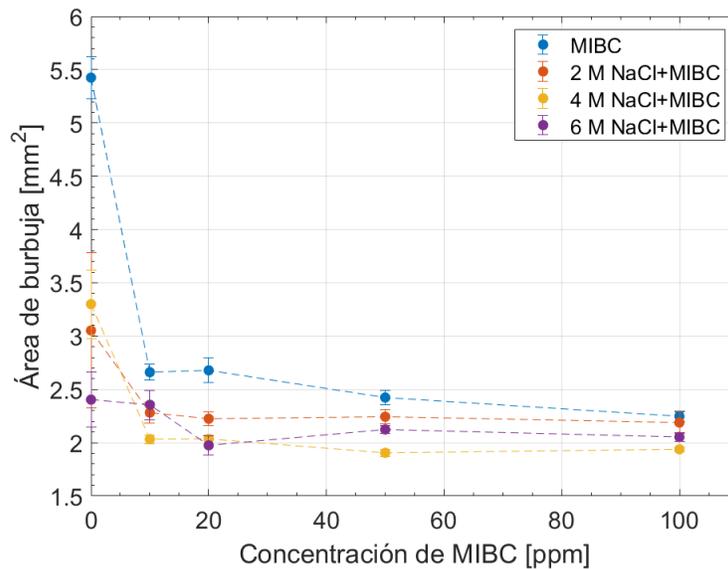
Este efecto se ve potenciado al introducir NaCl a la solución, dando lugar a una disminución aún mayor en el tamaño de las burbujas. En la solución de 2 M de NaCl, a partir de una concentración de MIBC de 10 ppm, el tamaño de las burbujas se estabiliza, manteniéndose constante independientemente de incrementos adicionales en la concentración de MIBC.

Similarmente, en una solución de 4 M de NaCl, se observó la misma constancia en el tamaño de las burbujas, aunque el tamaño promedio de las burbujas en esta solución es menor en comparación con la de 2 M de NaCl. Para una solución de 6M de NaCl, a partir de una concentración de MIBC de 50 ppm, el tamaño de las burbujas se mantiene entre los tamaños observados en las concentraciones de 2 M y 4 M de NaCl.

No obstante, es esencial tratar los resultados de 6 M + MIBC con cautela, ya que la cantidad de pruebas realizadas no es suficiente para llegar a conclusiones definitivas. Sin embargo, estos hallazgos preliminares sugieren un efecto notable de la concentración de NaCl en la solución de MIBC en el tamaño de las burbujas.



**Figura 5.10:** Promedio de las áreas de burbujas a diferentes concentraciones de NaCl.



**Figura 5.11:** Promedio de las áreas de burbujas a diferentes concentraciones de MIBC en soluciones sin y con NaCl.

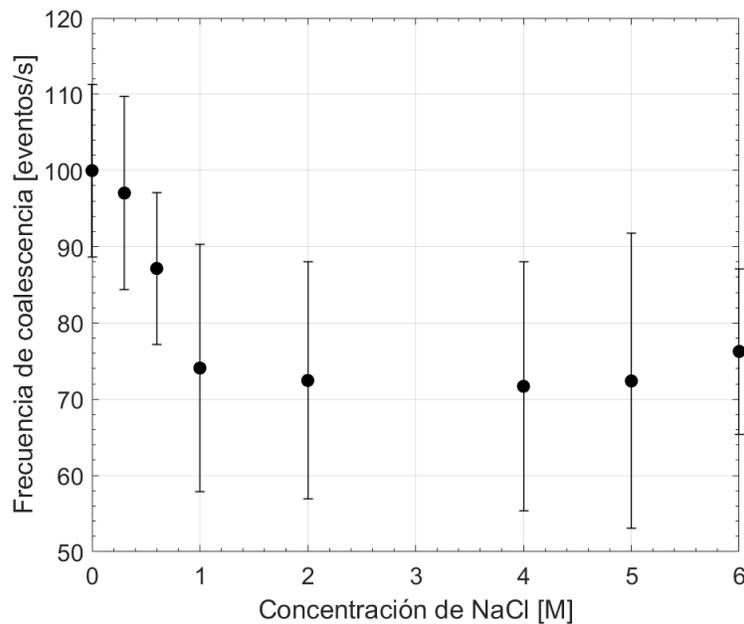
## 5.5. Frecuencia de eventos de coalescencia

Los datos presentados en la **Figura 5.12** indican que la concentración de NaCl tiene un efecto notable en los eventos de coalescencia. A medida que se incrementa la concentración de sal, los eventos de coalescencia disminuyen, lo que se mantiene hasta llegar a una concentración de 1 M de NaCl. Sin

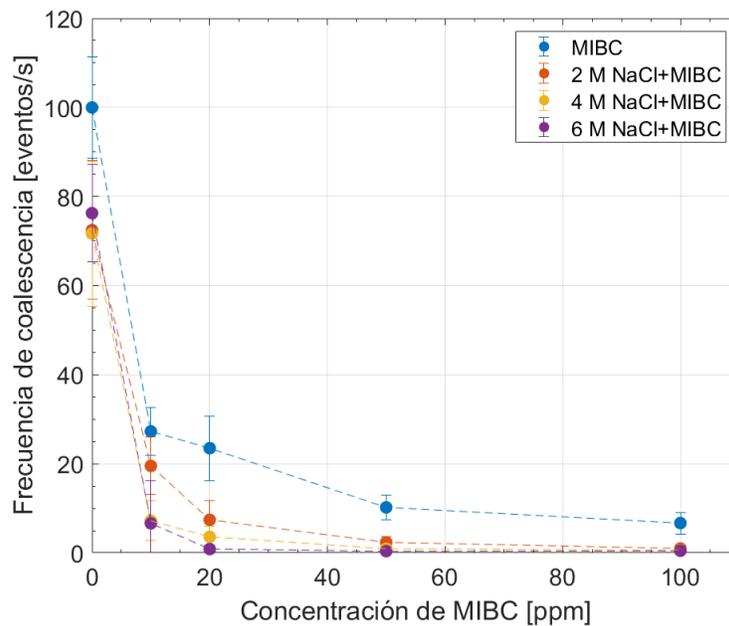
embargo, más allá de este punto, los datos indican que la disminución de los eventos de coalescencia se estanca, manteniéndose prácticamente constante hasta una concentración de 6 M de NaCl. Este resultado va muy de la mano con los de diámetro y área de burbujas en NaCl, los cambios se observan hasta 1 M.

La disminución observada en los eventos de coalescencia con el aumento de la concentración de NaCl podría deberse a un efecto estabilizador que la sal imparte a las burbujas. La constancia observada en la cantidad de eventos de coalescencia después de alcanzar la concentración de 1 M de NaCl puede sugerir que se ha alcanzado un umbral o límite en el efecto estabilizador de la sal. A partir de este punto, añadir más sal al sistema parece no tener un efecto adicional sobre los eventos de coalescencia.

En la **Figura 5.13**, se muestra la relación entre los eventos de coalescencia y la concentración del espumante MIBC. La tendencia general indica que a medida que aumenta la concentración de espumante, los eventos de coalescencia disminuyen, aunque no se evitan completamente. Sin embargo, la adición de sal a esta solución tiene un efecto marcado: los eventos de coalescencia se reducen a cero desde 50 ppm tanto para 4 M como para 6 M de NaCl. A una concentración de 2 M de NaCl, se requiere una concentración de 100 ppm de espumante para que la coalescencia sea nula.



**Figura 5.12:** Frecuencia promedio de los eventos de coalescencia a diferentes concentraciones de NaCl.



**Figura 5.13:** Frecuencia promedio de los eventos de coalescencia a diferentes concentraciones de MIBC en soluciones sin y con NaCl.

Por otro lado, la adición de sal potencia enormemente el efecto del espumante MIBC. A partir de cierta concentración de sal, los eventos de coalescencia se reducen a cero, lo que sugiere una interacción sinérgica entre la sal y el espumante que resulta en la prevención total de la coalescencia.

Es importante notar que no parece haber una diferencia significativa entre la adición de 4 M y 6 M de NaCl a la solución de MIBC, ya que se obtienen resultados prácticamente idénticos en términos de la prevención de la coalescencia. Esto podría indicar que, al igual que con la sal por sí sola, hay un umbral de saturación en la capacidad de la combinación de sal y espumante para prevenir la coalescencia.

Lo que sugiere que la interacción entre el MIBC y las burbujas es más fuerte que la interacción entre la sal y las burbujas. En resumen, la concentración de sal en una solución acuosa y la presencia de surfactantes pueden tener efectos diferentes en los eventos de coalescencia.

## 5.6. Tiempos de coalescencia

Los datos obtenidos de este estudio indican una correlación entre los tiempos de coalescencia y la concentración de NaCl. Específicamente, se observa un aumento general en los tiempos de coalescencia a medida que se incrementa la concentración de sal. Este aumento, sin embargo, parece tener un límite

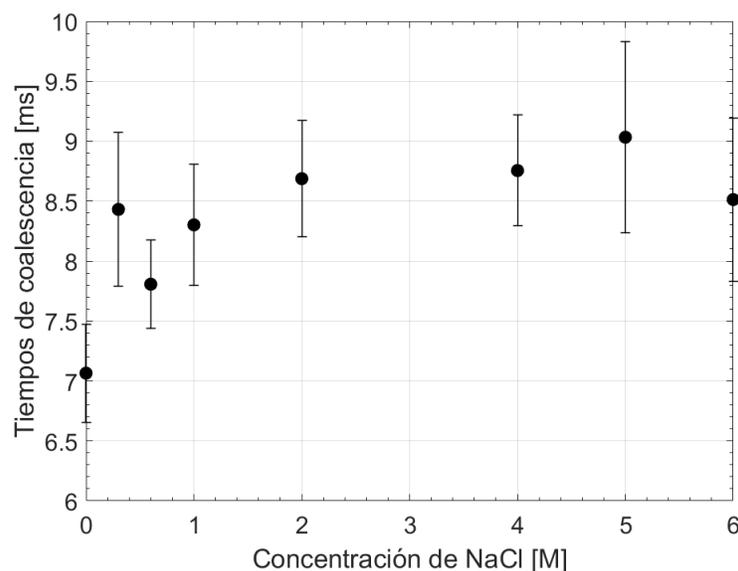
---

de 1 M, donde los tiempos de coalescencia ya no presentan grandes diferencias con concentraciones más altas. Tal como se ve en la **Figura 5.14**.

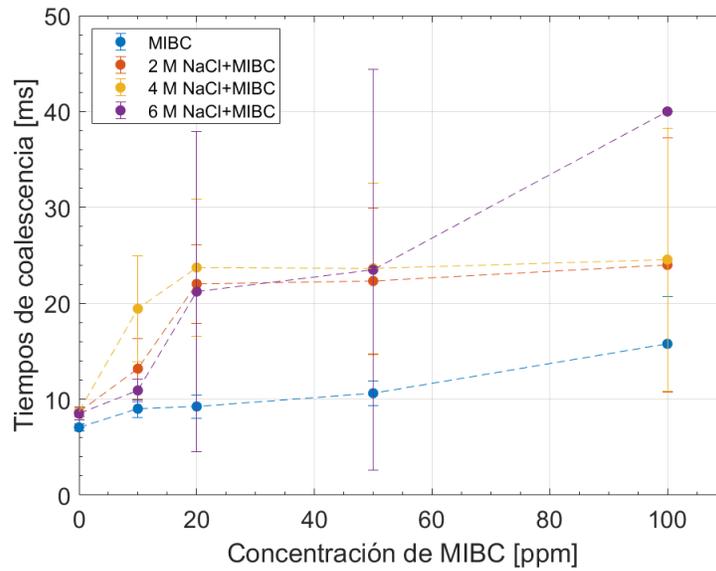
Sin embargo, hubo un resultado inesperado en la concentración de 0.3 M de NaCl. En este punto, los tiempos de coalescencia fueron superiores a los observados a 0.6 M y similares a los de 1 M, lo cual es contradictorio con la tendencia observada en otras concentraciones.

En lo que respecta a los tiempos de coalescencia en relación a las concentraciones de MIBC, se observa un aumento general conforme se incrementa la concentración del MIBC. Este efecto fue incluso más pronunciado cuando se agrega sal a la solución. A partir de las 20 ppm, los tiempos de coalescencia para las concentraciones de 2 M y 4 M de NaCl son similares hasta llegar a los 100 ppm, tal como se ve en la **Figura 5.15**.

No obstante, se nota una peculiaridad en los datos de la concentración de 6 M. Hasta las 20 ppm, los tiempos de coalescencia son menores que los de 2 M o 4 M. Pero a partir de las 50 ppm, estos tiempos se incrementan y superan los de las concentraciones menores. Sin embargo, es importante mencionar que se tomaron solamente 5 videos para la concentración de 6 M con MIBC, a diferencia de las otras concentraciones que contaron con 15 videos cada una, representando 3 muestras. Esto se debe a la dificultad de grabar a tan altas concentraciones, donde cualquier mínimo cambio en las condiciones de experimentación dificulta la grabación, principalmente debido a la precipitación de la sal que tapa los capilares por donde sale el aire para formar las burbujas en la celda.



**Figura 5.14:** Promedio de los tiempos de coalescencia a diferentes concentraciones de NaCl.



**Figura 5.15:** Promedio de los tiempos de coalescencia a diferentes concentraciones de MIBC en soluciones sin y con NaCl.

## 5.7. Análisis físico-químico

El diámetro de Sauter, el área de burbujas, la frecuencia de coalescencia de burbujas siguen comportamientos similares respecto a la concentración de NaCl y la dosis de MIBC. Estas tres características de las burbujas se estabilizan a 1 M de NaCl, a 50 ppm de MIBC, y a 20 ppm de MIBC en presencia de NaCl a cualquier concentración menor a 6 M.

Existe evidencia que sales como el NaCl aumentan la tensión superficial de soluciones acuosas, y que el efecto aumenta a medida que aumenta la concentración de la sal hasta un cierto límite. Resultados de simulación molecular (Jungwirth y Tobias, 2002, 2006, Mucha et al., 2005, Alvarado et al., 2022, 2023) y de experimentos con técnicas de espectroscopía selectiva (Liu et al., 2004, Shen y Ostroverkhov, 2006, Gopalakrishnan et al., 2006, Tarbuck et al., 2006, Levering y Hernández, 2007) han revelado que los iones  $\text{Na}^+$  y  $\text{Cl}^-$  prefieren la interfaz agua-aire, y el  $\text{Cl}^-$  algo más que el  $\text{Na}^+$ . Esta concentración en la interfase actúa rigidizándola y como consecuencia aumentando la tensión superficial. Se cree que esta mayor rigidez podría influir en el diámetro y área superficial de las burbujas, así como en la frecuencia de coalescencias. Sin embargo, es posible que el efecto electrostático debido a la presencia mayoritaria de iones  $\text{Cl}^-$  también juegue un papel importante.

Los iones de la sal rodean las burbujas por el lado de la solución líquida, que como se indicó rigidizan

---

la interfaz, impidiendo que las burbujas aumenten su tamaño por coalescencia, al menos hasta una cierta concentración de sal (1 M en las [Figuras 5.8, 5.10, y 5.12](#)). Por otra parte, el MIBC estabiliza las burbujas por su condición de surfactante. El lado polar del surfactante se orienta hacia la solución líquida, en tanto que el lado apolar lo hace hacia el aire al interior de las burbujas, esto las hace estable; la repulsión electrostática entre burbujas recubiertas de MIBC (su lado polar) impide su coalescencia. Este efecto del MIBC se logra a una cierta concentración (50 ppm en las [Figuras 5.9, 5.11, y 5.13](#)). Cuando MIBC y NaCl están presentes, las burbujas alcanzan mayor estabilidad. Estudios de simulación molecular indican que iones  $\text{Na}^+$  y  $\text{Cl}^-$  que compiten por la interfase obligan a las moléculas de MIBC, a medida que la dosis aumenta, a orientarse perfectamente ortogonal a la interfase con lo que maximizan su potencia surfactante. De esta manera se explica la presencia simultánea de  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ , y cadenas de MIBC en la interfase. Por un lado, los iones rigidizan porque aumentan la tensión superficial, y por otro lado las cadenas de MIBC tienden a bajar la tensión superficial recubriendo las burbujas con un casquete polar inmerso en la fase líquida que les da estabilidad. Existe una concentración crítica de MIBC a la cual los iones son desplazados de la interfaz, momento en que solo las cadenas de MIBC controlan la tensión superficial ([Alvarado et al., 2022, 2023](#)). En presencia de sal y MIBC el diámetro, el área y la frecuencia de coalescencia de burbujas se estabiliza a una dosis de MIBC que podemos llamar crítica (10 ppm en las [Figuras 5.9, 5.11, y 5.13](#)), y que es menor a la dosis a la que se alcanza tal estabilidad cuando el MIBC actúa solo.

Además de los efectos mencionados anteriormente, se ha propuesto que el efecto Marangoni también juega un papel crucial en la estabilidad de las burbujas ([Takagi y Matsumoto, 2011](#)). El efecto Marangoni, que se refiere al flujo de líquido a lo largo de una interfaz entre dos fluidos debido a un gradiente de tensión superficial, puede influir en la restitución de líquido entre las burbujas. Este fenómeno puede retrasar el adelgazamiento de la película de líquido entre las burbujas y, por lo tanto, retrasar su ruptura.

En el contexto de las soluciones acuosas de electrolitos, como las que contienen NaCl, el efecto Marangoni puede ser particularmente relevante ([Weissenborn y Pugh, 1996](#)). Como se mencionó anteriormente, las sales como el NaCl pueden aumentar la tensión superficial de las soluciones acuosas, y este efecto puede intensificarse a medida que aumenta la concentración de la sal. Este aumento en la tensión superficial puede, a su vez, intensificar el efecto Marangoni, lo que podría contribuir a la estabilidad de las burbujas y retrasar su coalescencia.

---

Además, en el caso de las soluciones que contienen surfactantes como el MIBC, el efecto Marangoni puede interactuar con los efectos de los surfactantes para influir en la dinámica de las burbujas (Weissenborn y Pugh, 1995). Los surfactantes pueden estabilizar las burbujas al reducir la tensión superficial y proporcionar una barrera contra la coalescencia de burbujas. Sin embargo, el efecto Marangoni puede contrarrestar este efecto al causar un flujo de líquido que puede retrasar el adelgazamiento de la película de líquido entre las burbujas.

La relación entre los tiempos de coalescencia y las concentraciones de NaCl y MIBC sigue los patrones discutidos previamente. Como se mencionó antes, la presencia de iones de NaCl en el medio puede dificultar la coalescencia de las burbujas. Esto se manifiesta en un aumento de los tiempos de coalescencia conforme se incrementa la concentración de sal, un fenómeno que puede ser explicado por un incremento en la interacción electrostática que obstaculiza la unión de las burbujas.

En un sentido similar, el aumento de los tiempos de coalescencia con la concentración de MIBC es coherente con los comportamientos previamente observados y discutidos. El MIBC, por su capacidad de surfactante, disminuye la tensión superficial de las burbujas, lo que puede prolongar el tiempo necesario para la coalescencia.

La intensificación de este efecto con la adición de sal apunta a que la interacción entre el MIBC y los iones de NaCl puede desempeñar un papel importante en la coalescencia de las burbujas. Se podría inferir que, a altas concentraciones de sal, el ambiente puede volverse demasiado hostil para que el MIBC ejerza eficazmente su función de surfactante. Esta hipótesis podría explicar por qué los tiempos de coalescencia inician con valores bajos a 2 M y 4 M, pero se incrementan con concentraciones a partir de las 50 ppm.

No obstante, la anomalía observada a 0.3 M de NaCl es intrigante y sugiere que pueden estar ocurriendo fenómenos adicionales que aún no se han considerado. Una posibilidad es que exista un umbral o una “zona de transición” en esta concentración específica, donde los tiempos de coalescencia cambian de ser relativamente bajos a altos. En otras palabras, a 0.3 M, se podría estar observando un punto de inflexión en el comportamiento de la coalescencia de las burbujas.

Además, a esta concentración de 0.3 M, la estructura del agua podría estar en un estado intermedio, donde ni las interacciones electrostáticas ni las fuerzas de coalescencia son dominantes. Las interacciones electrostáticas pueden estabilizar las burbujas y prevenir la coalescencia, mientras que las

---

fuerzas de coalescencia pueden causar que las burbujas se unan y coaleszcan. Por lo tanto, un equilibrio delicado entre estos dos efectos podría resultar en un tiempo de coalescencia inusualmente alto.

En cuanto a la anomalía observada a 6 M de NaCl, hay varios factores que podrían estar contribuyendo. Uno de ellos es el número limitado de vídeos tomados para esta concentración, lo que podría haber introducido un sesgo en los resultados. Además, las dificultades técnicas encontradas a altas concentraciones, como el taponamiento de los capilares debido a la precipitación de la sal, podrían haber afectado la calidad de los datos. A altas concentraciones de sal, el factor de la temperatura se vuelve crucial, ya que puede influir en la solubilidad de la sal y, por lo tanto, en su tendencia a precipitar y causar taponamientos. Este tipo de problemas técnicos podría explicar la anomalía observada a 6 M de NaCl.

Para confirmar estas hipótesis y obtener una comprensión más clara de lo que está ocurriendo, sería útil repetir los experimentos con un rango más amplio de concentraciones de NaCl, especialmente alrededor de 0.3 M y 0.6 M. También sería beneficioso realizar más experimentos a 6 M en presencia de MIBC, y asegurarse de que se toman suficientes vídeos y se manejan las dificultades técnicas para obtener datos de alta calidad.

En resumen, aunque se han hecho algunos descubrimientos interesantes, queda claro que se necesita más investigación para resolver completamente estas anomalías y comprender de manera integral la relación entre la concentración de NaCl, los tiempos de coalescencia y la presencia de MIBC. Esto podría implicar tanto la realización de más experimentos como la exploración de modelos teóricos que puedan explicar los datos observados.

---

## 6. Conclusiones

En este estudio se exploró el efecto de altas concentraciones de sal en la estabilidad y coalescencia de burbujas en una columna de burbujeo, utilizando algoritmos de visión artificial para el análisis cuantitativo. Los algoritmos demostraron ser esenciales en el estudio de la coalescencia de burbujas en un sistema dinámico con una gran cantidad de burbujas.

Se optimizó una columna de burbujeo existente y se capturaron videos de alta calidad del sistema de burbujas. A partir del análisis de los videos, se determinaron los tamaños de burbuja, los eventos de coalescencia y los tiempos de coalescencia.

Se descubrió una relación inversa entre la concentración de NaCl y la frecuencia de coalescencia y se propuso un mecanismo por el cual la alta concentración de sal aumenta la estabilidad interfacial. Este efecto se potenció con la adición del espumante MIBC, lo que sugiere una interacción sinérgica entre la sal y el espumante que contribuye a la prevención de la coalescencia de manera más efectiva cuando ambos están presentes en la solución.

Estos resultados de eventos y tiempos de coalescencia de burbujas en soluciones hiperconcentradas de sal revelan tendencias y comportamientos que permiten una mejor comprensión de la estabilidad de las burbujas en sistemas dinámicos de burbujeo, similares a los que se encuentran en los procesos de flotación a escala industrial.

A pesar de algunas anomalías observadas en los datos, estas conclusiones proporcionan una comprensión valiosa de cómo las altas concentraciones de sal y la adición de MIBC afectan la estabilidad y coalescencia de las burbujas. Estos hallazgos tienen implicaciones significativas para varios procesos industriales y sientan una base sólida para futuras investigaciones.

---

## 7. Recomendaciones

En cuanto a las recomendaciones para futuras investigaciones basadas en los resultados de este estudio, se destacan dos puntos principales.

Primero, es fundamental explorar en mayor profundidad el rango de concentraciones de NaCl entre 0 y 1 M. La anomalía observada en la concentración de 0.3 M de NaCl en los tiempos de coalescencia, requiere una explicación más detallada. La realización de experimentos adicionales en este rango permitirá precisar si el comportamiento anómalo en 0.3 M de NaCl se debe a un fenómeno específico o a algún factor de confusión en la experimentación a esta concentración específica. En este sentido, podría ser útil llevar a cabo experimentos a más concentraciones en torno a 0.3 M y 0.6 M y realizar medidas adicionales que permitan entender mejor las interacciones a nivel molecular en estas concentraciones.

En segundo lugar, se recomienda realizar más experimentos a la concentración de 6 M de NaCl en combinación con MIBC. Los datos presentados en este estudio en esta concentración pueden haber sido sesgados debido al número reducido de muestras y a las dificultades técnicas en la experimentación a altas concentraciones. Por lo tanto, sería beneficioso desarrollar un protocolo experimental que permita la grabación de más vídeos en estas condiciones sin precipitación de la sal. Con un control más riguroso del ambiente experimental, será posible obtener datos más confiables y poder determinar con mayor precisión la influencia de estas altas concentraciones de NaCl y MIBC en los eventos y tiempos de coalescencia.

Finalmente, se anima a continuar investigando en este campo, ya que estos hallazgos podrían tener implicaciones significativas en la optimización de diversos procesos industriales en los que se involucra la coalescencia.

---

## 8. Referencias

- Aitken, D., Rivera, D., Godoy-Faúndez, A., y Holzapfel, E. (2016). Water scarcity and the impact of the mining and agricultural sectors in Chile. *Water Scarcity and the Impact of the Mining and Agricultural Sectors in Chile*, 8(2).
- Alvarado, O., Quezada, G. R., Saavedra, J. H., Rozas, R. E., Gutiérrez, L., y Toledo, P. G. (2023). Alkali Halide and MIBC Interaction at Typical Flotation Interfaces in Saline Water as Determined by Molecular Dynamics Simulations. *Minerals*, 13(5).
- Alvarado, O., Quezada, G. R., Saavedra, J. H., Rozas, R. E., Gutiérrez, L., y Toledo, P. G. (2022). Species Surface Distribution and Surface Tension of Aqueous Solutions of MIBC and NaCl Using Molecular Dynamics Simulations. *Polymers*, 14.
- Bournival, G., Pugh, R., y Ata, S. (2012). Examination of NaCl and MIBC as bubble coalescence inhibitor in relation to froth flotation. *Minerals Engineering*, 25(1):47–53.
- Bulatovic, S. M. (2007). *Handbook of Flotation Reagents: Chemistry, Theory and Practice*. Elsevier.
- Castro, S., Miranda, C., Toledo, P., y Laskowski, J. (2013). Effect of frothers on bubble coalescence and foaming in electrolyte solutions and seawater. *International Journal of Mineral Processing*, 124:8–14.
- Del Castillo, L. A., Ohnishi, S., y Horn, R. G. (2011). Inhibition of bubble coalescence: Effects of salt concentration and speed of approach. *Journal of Colloid and Interface Science*, 356(1):316–324.
- Dunn, B., Kamath, H., y Tarascon, J. M. (2011). Electrical energy storage for the grid: A battery of choices. *Science*, 334(6058):928–935.
- Farrokhpay, S. (2011). The significance of froth stability in mineral flotation — a review. *Advances in Colloid and Interface Science*, 166(1):1–7.
- Garreaud, R. D., Alvarez-Garretón, C., Barichivich, J., Boisier, J. P., Christie, D., Galleguillos, M., LeQuesne, C., McPhee, J., y Zambrano-Bigiarini, M. (2017). The 2010-2015 megadrought in central Chile: impacts on regional hydroclimate and vegetation. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(12):6307–6327.
- Gopalakrishnan, S., Liu, D., Allen, H. C., Kuo, M., y Shultz, M. J. (2006). Vibrational spec-

- 
- troscopic studies of aqueous interfaces: salts, acids, bases, and nanodrops. *Chemical Reviews*, 106(4):1155–1175.
- Grau, R. y Heiskanen, K. (2005). Bubble size distribution in laboratory scale flotation cells. *Minerals Engineering*, 18(12):1164–172.
- Jungwirth, P. and Tobias, D. J. (2002). Ions at the air/water interface. *The Journal of Physical Chemistry B*, 106(25):6361–6373.
- Jungwirth, P. y Tobias, D. J. (2006). Specific ion effects at the air/water interface. *Chemical Reviews*, 106(4):1259–1281.
- Kesler, S. E., Gruber, P. W., Medina, P. A., Keoleian, G. A., Everson, M. P., y Wallington, T. J. (2012). Global lithium resources: Relative importance of pegmatite, brine and other deposits. *Ore Geology Reviews*, 48:55–69.
- Lagos, L. (2023). Efecto de partículas minerales en los eventos de coalescencia en un sistema dinámico de burbujeo. *Habilitación profesional*, Universidad del Bío-Bío.
- Levering, L. M., Sierra-Hernández, M. R., y Allen, H. C. (2007). Observation of hydronium ions at the air/aqueous acid interface: Vibrational spectroscopic studies of aqueous hcl, hbr, and hi. *Journal of Physical Chemistry C*, 111:8814–8826.
- Liu, D., Ma, G., Levering, L. M., y Allen, H. C. (2004). Vibrational spectroscopy of aqueous sodium halide solutions and air-liquid interfaces: Observation of increased interfacial depth. *Journal of Physical Chemistry B*, 108:2252–2260.
- Maxwell, P. y Mora, M. (2020). Lithium and chile: looking back and looking forward. *Mineral Economics*, 33:57–71.
- Melo, F. y Laskowski, J. (2006). Fundamental properties of flotation frothers and their effect on flotation. *Minerals Engineering*, 19(6):766–773.
- Mucha, M., Frigato, T., Levering, L. M., Allen, H. C., Tobias, D. J., Dang, L. X., y Jungwirth, P. (2005). Unified molecular picture of the surfaces of aqueous acid, base, and salt solutions. *The Journal of Physical Chemistry B*, 109(16):7617–7623.

- 
- Pan, Y., Gresham, I., Bournival, G., Prescott, S., y Ata, S. (2022). Synergistic effects of frothers, collector and salt on bubble stability. *Powder Technology*, 397:117028.
- Peña, A. (2021). Estudio de estabilidad de burbujas y espuma de soluciones acuosas de espumantes en ausencia y presencia de cloruro de sodio en una columna de burbujeo. *Habilitación profesional*, Universidad del Bío-Bío.
- Shen, Y. R. y Ostroverkhov, V. P. (2006). Sum-frequency vibrational spectroscopy on water interfaces: polar orientation of water molecules at interfaces. *Chemical reviews*, 106 4:1140–54.
- Solar, C. (2022). Determinación de tiempos de coalescencia de burbujas en un sistema dinámico de burbujeo mediante técnicas computacionales de procesamiento de imágenes. *Habilitación profesional*, Universidad del Bío-Bío.
- Takagi, S. y Matsumoto, Y. (2011). Surfactant effects on bubble motion and bubbly flows. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 43(1):615–636.
- Tarascon, J. y Armand, M. (2001). Issues and challenges facing rechargeable lithium batteries. *Nature*, 414:359–367.
- Tarback, T. L., Ota, S. T., y Richmond, G. L. (2006). Spectroscopic studies of solvated hydrogen and hydroxide ions at aqueous surfaces. *Journal of the American Chemical Society*, 128(45):14519–14527.
- Ulloa, Y. (2022). Estudio del comportamiento de burbujas en soluciones acuosas de mibc y nacl mediante análisis de imágenes de un sistema dinámico de burbujeo en columna de pared delgada. *Habilitación profesional*, Universidad del Bío-Bío.
- UNESCO (2023). Riesgo inminente de una crisis mundial del agua: Unesco. Recuperado el 8 de mayo de 2023.
- United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (2019). Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2019: No dejar a nadie atrás. UNESCO.
- Weissenborn, P. K. y Pugh, R. J. (1995). Surface tension and bubble coalescence phenomena of aqueous solutions of electrolytes. *Langmuir*, 11(5):1422–1426.
- Weissenborn, P. K. y Pugh, R. J. (1996). Surface tension of aqueous solutions of electrolytes: Re-

---

lationship with ion hydration, oxygen solubility, and bubble coalescence. *Journal of Colloid and Interface Science*, 184(2):550–563.

Wills, B. A. y Finch, J. A. (2016). *Wills' Mineral Processing Technology*. Butterworth-Heinemann, eighth edition.

---

## A. Anexos

### A.1. Protocolo de preparación de muestras

A continuación, se presentan en detalle los procedimientos utilizados en la preparación de las muestras para este estudio, incluyendo la preparación de soluciones de NaCl y MIBC, y la mezcla de ambas para su uso en la columna de burbujeo. Cada paso se realizó con la máxima precisión y cuidado, asegurando la homogeneidad de las soluciones y la pureza de las muestras utilizadas en este estudio.

- Solución de NaCl:

1. Se pesó la cantidad de NaCl necesaria para cada concentración (0, 1, 2, 4, 5 y 6 molar) utilizando una balanza analítica.
2. La cantidad de NaCl se disolvió en agua desmineralizada utilizando matraces aforados de 100 mL.
3. La solución se agitó para asegurar una mezcla homogénea.
4. Para las soluciones de NaCl de 5 y 6 molar, se agregó la cantidad de sal a un vaso precipitado y se agitó constantemente con un agitador magnético para asegurar una disolución completa. Debido a que la solubilidad de NaCl es a altas concentraciones es limitada en agua, el proceso de disolución es más lento y requiere una agitación constante para lograr la homogeneidad de la solución.

- Solución de MIBC:

1. Se midió la cantidad necesaria de MIBC para cada concentración (0, 10, 20, 50 y 100 ppm) utilizando una micropipeta.
2. A cada matraz aforado de 100 mL se agregó agua desmineralizada hasta el aforo.
3. La cantidad de MIBC se agregó a los matraces aforados de 100 mL.
4. La solución se agitó para asegurar una mezcla homogénea.

- Mezcla de NaCl y MIBC:

1. Se prepararon soluciones de NaCl a concentraciones de 2, 4 y 6 molar siguiendo los mis-

- 
- mos pasos descritos anteriormente.
2. Se midió la cantidad necesaria de MIBC para cada concentración (2, 4 y 6 molar) utilizando una micropipeta.
  3. La cantidad de MIBC se agregó a matraces aforados de 100 mL conteniendo la solución de NaCl correspondiente.
  4. La solución se agitó para asegurar una mezcla homogénea.